



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанологии и комплексного управления

прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Сверхдолгосрочное прогнозирование гидрометеорологических
характеристик статистическими методами»

Исполнитель: Россиева Елизавета Андреевна

Руководитель: кандидат географических наук

Густоев Дмитрий Владимирович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«16» 06 2025 г.

г. Санкт-Петербург

2025

Оглавление

Введение.....	3
1. Физико-географическое положение моря Лабрадор.....	4
1.1 Географическое положение	4
1.2 Геология и рельеф дна.....	7
1.3 Гидрологический режим	11
1.4 Климатический режим	12
1.5 Энергоактивная зона	15
1.6 Ледовая обстановка	17
2. Прогнозы и их методы. Сверхдолгосрочное прогнозирование	21
2.1 Развитие прогнозирования.....	21
2.2 Типы прогнозов и их заблаговременность.....	23
2.3 Сверхдолгосрочное прогнозирование	27
2.4 Методы долгосрочного прогнозирования.....	31
2.5 Использование статистического метода в сверхдолгосрочном прогнозировании и его этапы	34
2.6 Критерии качества и оценка эффективности метода прогнозов	41
3. Аналитическая часть	42
3.1 Анализ среднегодовой температуры поверхности моря Лабрадор.....	43
3.2 Анализ среднегодовой температуры воздуха моря Лабрадор	48
3.3 Анализ среднегодового атмосферного давление моря Лабрадор 1949-2023 гг. 53	
3.4 Анализ выхода на безледный режим акватории моря Лабрадор.....	58
Заключение	62
Список использованной литературы.....	63

Введение

Актуальность:

Прогнозирование гидрометеорологических характеристик является важной задачей, стоящей перед научным сообществом, так как потребность в своевременном и качественном прогнозе со стороны общества растёт. Поэтому чёткое понимание причинно-следственных связей между данными гидрометеорологическими характеристиками и природными явлениями, позволяет оценивать климатические изменения конкретного района, предсказывать погоду и предвидеть опасные погодные явления. С учетом многовековых данных можно с высокой точностью прогнозировать погоду на несколько дней, недель и месяцев.

Однако прогнозирование на срок от нескольких месяцев до нескольких лет – это особо сложная задача, требующая использования статистического метода, так как за такой срок может произойти множество непредвиденных погодных и климатических изменений, из-за этого приходится полагаться на многолетние статистические данные.

Целью данной дипломной работы будет являться составление прогнозов различными статистическими методами, их сравнение и анализ.

Задачи работы:

- Нахождение нужной временной серии
- Анализ временного ряда
- Составление прогнозов разными методами
- Сравнение результатов прогноза и выводы

1. Физико-географическое положение моря Лабрадор

1.1 Географическое положение

Море Лабрадор или Лабрадорское море – это окраинное море северной части Атлантического океана, формирующее климат северо-западной части континентальной и островной Северной Америки и юго-восточной части острова Гренландия. Море расположено между полуостровом Лабрадор и островом Ньюфаундленд на юго-западе и островом Гренландия на северо-востоке (*см. рисунок 1*).

Северная граница акватории моря Лабрадор определяется на 60° северной широты, там, где море соединяется с морем Баффина, которое является окраинным морем Северно-Ледовитого океана, проливом Девиса (*см. рисунок 2*).

Юго-восточная граница моря Лабрадор определяется по прямой от мыса Фарвель до мыса Сент-Франсис (мысы Гренландии и Ньюфаундленда) (*см. рисунок 2*).

Западная граница акватории – это переход от моря Лабрадор в Гудзонов залив через Гудзонов пролив (*см. рисунок 2*).

Всё вышеописанное создаёт активную циркуляцию вод внутри акватории моря Лабрадор, поэтому влияние моря на климат близлежащей суши невозможно приуменьшить.



Рисунок 1. Географическое расположение моря Лабрадор на карте мира



Рисунок 2. Название морских объектов близ моря Лабрадор

Море Лабрадор является окраинным морем континентальной и островной Канады (полуостров Лабрадор и остров Ньюфаундленд) и автономной области Дании (остров Гренландия) (см. рисунок 3)

Также море является важной транспортной артерией между Атлантическим океаном и Тихим океаном. Через море Лабрадор можно добраться от западного побережья Северной Америки до её восточного побережья. Хотя этот путь опаснее, чем через Панамский канал, однако, при определённых условиях, он намного быстрее.



Рисунок 3. Страны вокруг моря Лабрадор

Таблица 1. Физические характеристики моря Лабрадор

Характеристика	Значение
Площадь	841 000 км ²
Объём	1 596 000 км ³
Максимальная длина	Около 1000 км
Максимальная ширина	Около 900 км
Наибольшая глубина	4316 м
Средняя глубина	1898

1.2 Геология и рельеф дна

Море Лабрадор образовалось в результате расхождения двух литосферных плит. Процесс расхождения начался в начале мелового периода (около 95 млн. лет назад), когда Гренландская литосферная плита начала отдаляться от Северо-Американской литосферной плиты и от Евразийской литосферной плиты, тем самым разделив континент Лавразия на два континента поменьше - Северную Америку и Евразию, и множество островов, в том числе и остров Гренландия (см. рисунок 4)



Рисунок 4. Разделение континента Лавразия на Северную Америку и Евразию.

Только в середине Палеогенового периода (около 40 млн лет назад) море полностью приняло свой современный вид и процесс формирования дна прекратился.

Рельеф дна моря Лабрадор весьма разнообразен, из-за движения литосферных плит и вулканической активности присутствует множество хребтов и котловин, впадин и возвышенностей.

В рельефе дна моря выделяются три зоны (см. рисунок 5):

- шельфовая зона
- континентальный склон
- глубоководная котловина



Рисунок 5. Строение морского дна

Шельфовая зона (глубиной до 200 метров и шириной до 250 км) моря Лабрадор занимает около 22% от общей площади дна. Наибольшая протяженность встречается около побережья полуострова Лабрадора и острова Ньюфаундленд (Рисунок 6).

Континентальный склон моря Лабрадор в северной части акватории упирается в подводный хребет глубиной 800 метров, разделяющий море Лабрадор и море Баффина, данное разделение происходит через пролив Девиса.

На юго-востоке акватории моря Лабрадор глубина континентального склона круто опускается до 2000 метров, а затем до глубины 3700 метров, но процесс понижения происходит плавно (см. рисунок 6).

В центральной части моря располагается Лабрадорская впадина с максимальной глубиной 4316 метров (см. рисунок 6).

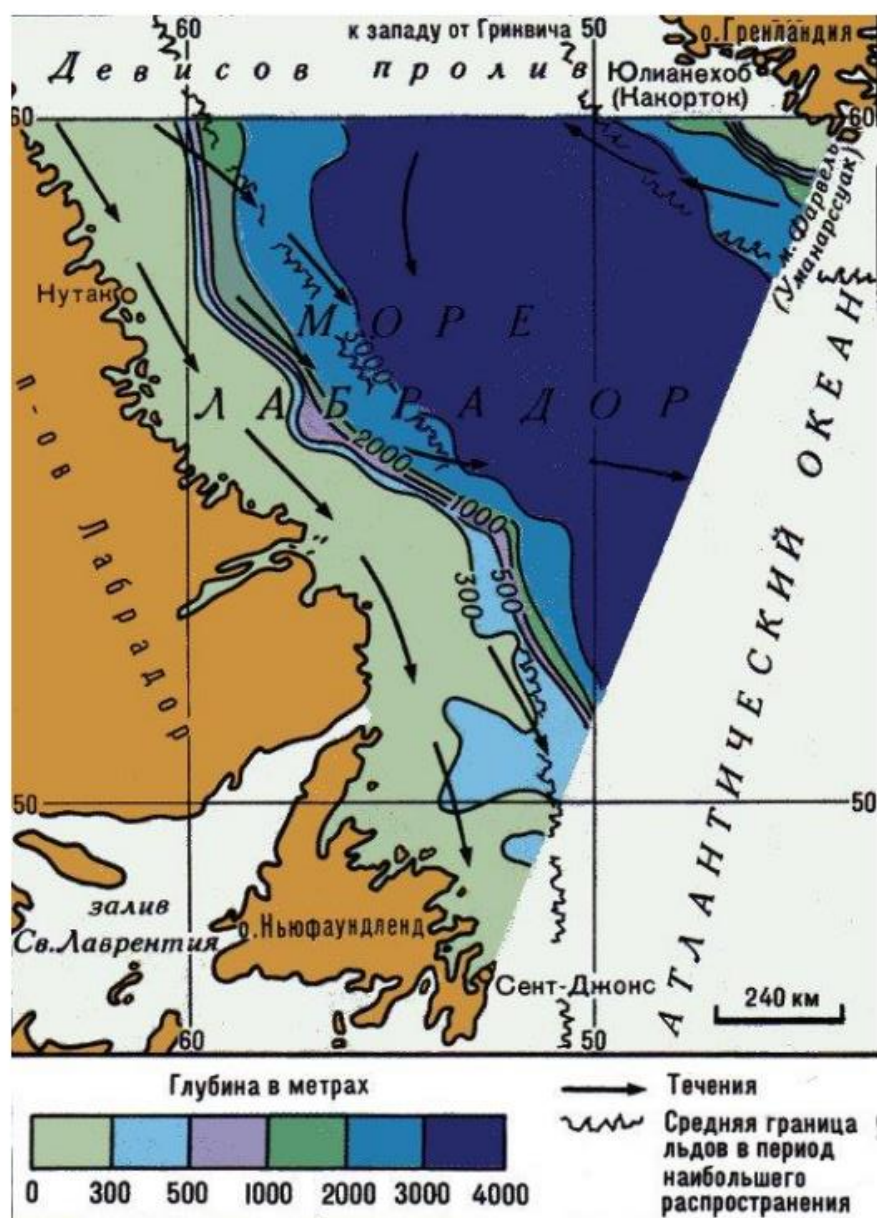


Рисунок 6. Рельеф дна моря Лабрадор

С юго-запада на северо-восток по дну тянется северная часть срединно-атлантического каньона (NAMOC - The Northwest Atlantic Mid-Ocean Channel),

протяженностью около 3800 км, с глубиной ниже основного уровня дна на 100-200 метров и шириной от 1,5 до 2,5 км (см. рисунок 7).

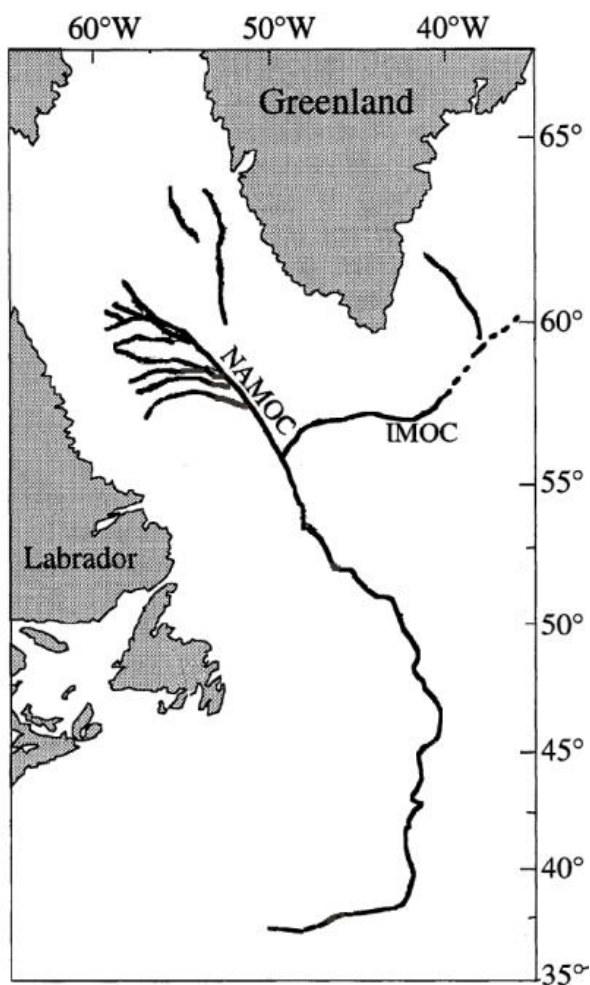


Рисунок 7. Срединно-атлантический хребет на карте

Шельфовая часть моря Лабрадор из-за своей мелководности и протяжённости в летнее время быстрее прогревается и передаёт тепло более глубоководным частям акватории, а в зимнее время раньше охлаждается и охлаждает близлежащие воды. Тем самым шельфовая часть моря Лабрадор принимает активное участие в термодинамических процессах моря.

Глубоководная часть Лабрадорского моря в термическом отношении более стабильная, так как сильно не прогревается летом, а зимой дольше отдаёт тепло и охлаждается.

1.3 Гидрологический режим

Гидрологический режим моря Лабрадор определяется ограниченным водообменном с Атлантическим океаном на юго-западе и Северно-Ледовитым океаном через пролив Девиса и море Баффина на севере акватории, а также со стороны континента Северная Америка речным стоком и со стороны острова Гренландия таянием ледников. Перенос воды со стороны суши опресняет прибрежный поверхностный слой моря Лабрадор

Циркуляция водных масс Лабродорского моря, как и сила Кориолиса в северном полушарии, отклоняется вправо, то есть поступающее течение от южного побережья острова Гренландия движется на север и заворачивает против часовой стрелки. Скорость течения варьируется от 0,2 м/с до 1 м/с (см. рисунок 8).

Течения:

- Западно-Гренландское течение – тёплое течение вдоль юго-западного побережья острова Гренландия из Атлантического океана, движется с юга на север.
- Лабрадорское течение – холодное течение вдоль северо-восточного побережья Северной Америки, движется с севера на юг, выделяется стоком пресной воды, что делает воду менее солёной, чем в других частях моря Лабрадор.

Западно-Гренландское течение встречается с Лабрадорским течением на севере акватории моря Лабрадор, где оно переходит в пролив Девиса.

На глубине 2500-300 метров из Гренландского моря через Атлантический океан в море Лабрадор поступают плотные (более солёные) водные массы, формирующие в акватории моря Лабрадор придонные течения

Гидрологические характеристики:

- Температура поверхности воды: летом от 2°C до 10°C, зимой от -1,7°C до 4°C.
- Температура на глубине 100 м: ниже -1°C даже летом.
- Солёность: от 31,5‰ до 34,5‰
- Приливы: 1,7–2,1 м у юго-западного побережья моря, до 5 м у мыса Фарвель.
- Плотность воды: сильных различий между летним и зимним периодами нет, но прибрежные воды менее плотные, чем в центральной части, из-за опреснения речным стоком и таянием ледников.



Рисунок 8. Циркуляция вод моря Лабрадор

1.4 Климатический режим

Море Лабрадор располагается в зоне влияние умеренного климатического пояса (южная акватория) и субарктического климатического пояса (северная акватория).

Из-за этого между южными и северными частями моря есть существенные различия:

- Юг, юго-восток и восток – климат мягкий морской.
- Север, северо-запад, запад – суровый арктический и резко-континентальный

Температурный режим:

Зимой температура воздуха на северо-западе моря Лабрадор обычно падает до -18°C , рядом с мысом Фарвель на юго-востоке — максимальные отрицательные температуры около -6°C . В центральных и западных частях региона средние температуры колеблются в диапазоне от -14°C до -8°C , а у берегов Ньюфаундленда температуры обычно находятся в пределах от -10°C до -2°C . Летом температуры сильно варьируются: на севере-западе примерно -6°C , а на юго-востоке достигают 12°C . В центральных и восточных районах температура примерно составляет около 8°C (см. рисунок 9).

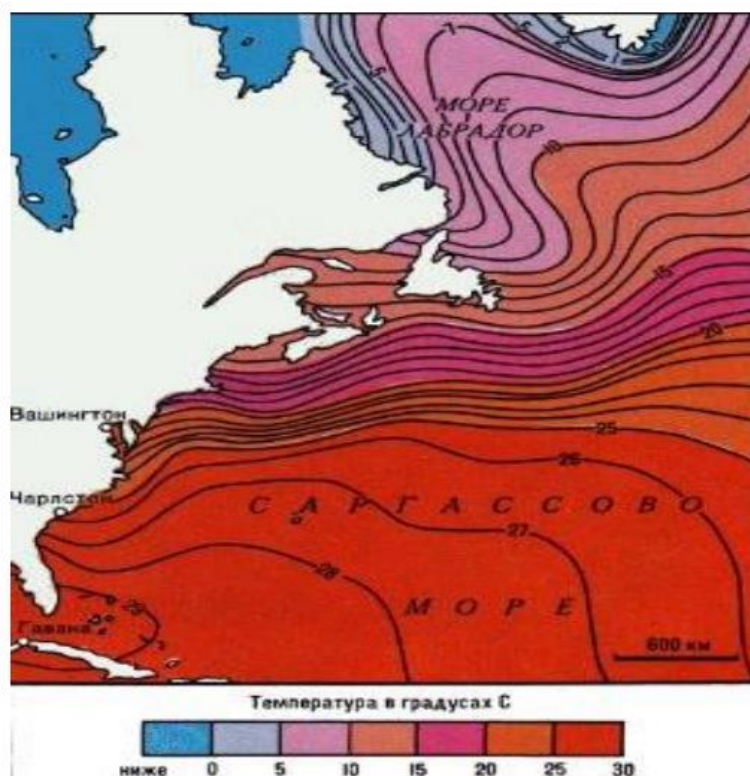


Рисунок 9. Среднее многолетнее распределение температур моря Лабрадор

Атмосферная циркуляция и осадки:

В зимний период над морем Лабрадор усиливается циклоническая деятельность, связанная с Исландским минимумом. Циклоны, перемещающиеся вдоль Гольфстрима, приносят холодный воздух с материка, что обуславливает суровые зимы на севере и западе моря. Восточная часть меньше подвержена влиянию зимних циклонов.

Летом интенсивность циклонической деятельности снижается, преобладают юго-западные, западные и южные ветры.

Среднегодовое количество осадков моря Лабрадор составляет около 1500 мм, у берегов Ньюфаундленда чуть выше - около 1900 мм, в северо-западной части - менее 1000 мм, а к северу от 55° с.ш. на канадской стороне - менее 250 мм, что является следствием сухого континентального климата.

Вклад океанических течений на климат:

Тёплое Западно-Гренландское течение и холодное Лабрадорское течение оказывают большое влияние на климат Лабрадорского моря. Первое формирует мягкий климат в юго-восточной части моря, а второе течение формирует холодный климат в западной и северо-западной части моря (см. рисунок 10).



Рисунок 10. Циркуляция вод Атлантического океана

1.5 Энергоактивная зона

Море Лабрадор – это энергоактивная зона Мирового океана. В данном море взаимодействие в системе «океан-атмосфера» очень интенсивное, как и в Ньюфаундленской и Бермудской зоне.

Основная часть энергоактивной зоны моря Лабрадор расположена в центральной и северо-западной части акватории, где глубина превышает 2 км, а условия для вертикального перемешивания наиболее благоприятны.

В зимнее время над акваторией моря формируются области глубокой конвекции, приводящие к апвеллингу из-за теплоотдачи океана атмосфере.

Опреснённое Лабрадорское течение также на интенсивность теплообмена и формирование энергоактивной зоны, перенося холодные водные массы.

Перемешивание и глубокая конвекция в этой зоне способствуют формированию глубинных вод, которые затем участвуют в глобальной термохалинной циркуляции — так называемом «конвейере» океанических течений.

Энергоактивная зона моря Лабрадор оказывает значительное влияние на климат прилегающих регионов и способствует образованию айсбергов.

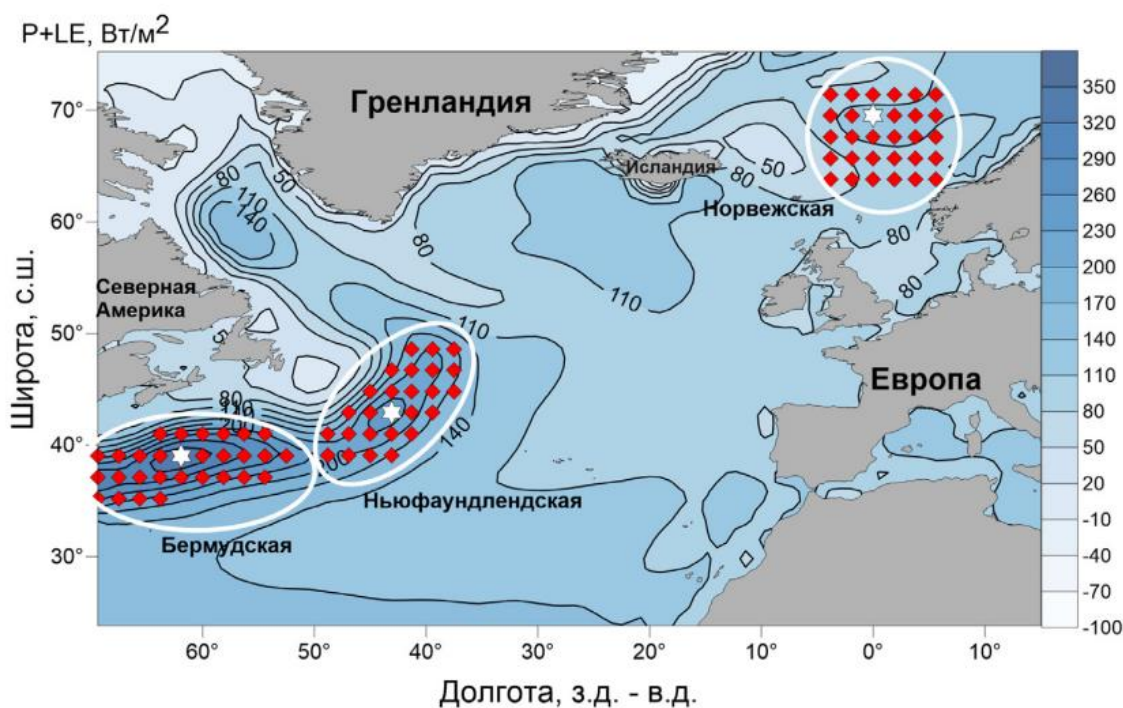


Рисунок 11. Энергоактивные зоны в северной части Атлантического океана.

1.6 Ледовая обстановка

Ледовая обстановка моря Лабрадор весьма динамична. Оттого состояние поверхности моря Лабрадор напрямую влияет на экосистему акватории, судоходство, а также является климатообразующим фактором.

Формирование льда в акватории моря Лабрадор начинается в период с ноября по декабрь (см. рисунок 12), достигая своего максимума в декабре-марте. Море полностью не замерзает никогда, максимум замерзания только около 2/3 общей площади моря.

Только в летний период море является безопасным для судоходства. Примерно к июлю лёд полностью тает.

Основным источником льда в море Лабрадор является Лабрадорское течение — холодное и менее солёное течение, движущееся вдоль побережья Канады на юг, переносящее значительное количество айсбергов и дрейфующих ледяных полей.

Лабрадорское течение подхватывает лёд, прибывший через пролив Девиса, и переносит его в Северную часть Атлантического океана. Таким образом, лёд из Северного-Ледовитого океана попадает в Атлантический.

Ледяной покров в западной части моря, особенно вдоль побережья Лабрадора и Ньюфаундленда, формируется в основном за счёт молодого льда, который начинает образовываться в октябре и достигает максимальной толщины в зимние месяцы.

Максимальная толщина припайного льда моря Лабрадор обычно не превышает нескольких десятков сантиметров. Это связано с влиянием Атлантического океана и циркуляцией тёплых водных масс в юго-восточной части моря. Ледовая обстановка в северо-западных районах более суровая, с

более продолжительным и плотным ледяным покровом, что обусловлено более холодным климатом и меньшим влиянием тёплых течений.

Ледовые условия оказывают значительное влияние на хозяйственную деятельность в регионе. Айсберги и дрейфующий лёд создают препятствия для судоходства, ограничивая навигационный период и требуя постоянного мониторинга ледовой обстановки.

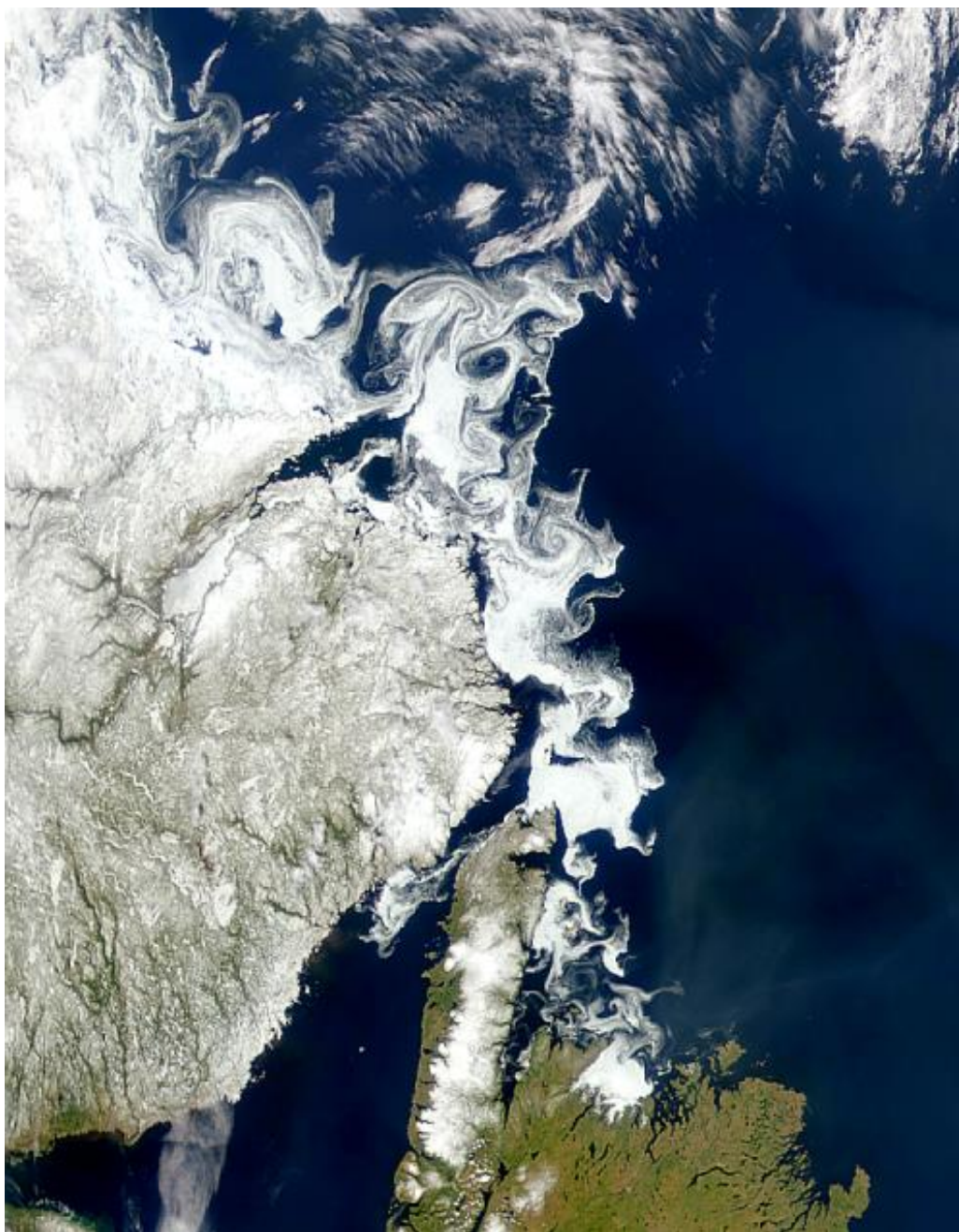


Рисунок 12. Процесс формирования льда в море Лабрадор

Ледовый режим:

Ледовый режим моря Лабрадор характеризуется значительными сезонными и межгодовыми колебаниями ледяного покрова моря.

Влияние течений на ледообразование:

Лабрадорское течение, несущее холодную арктическую воду с низкой соленостью, играет решающую роль в ледовом режиме моря, в то время как атлантические воды из Западно-Гренландского течения также влияют на ледовую обстановку.

Сезонная изменчивость:

Морской лед присутствует примерно 4 месяца в году, при этом Лабрадорское море переживает "сезон морского льда", который варьируется по времени и продолжительности.

Межгодовая изменчивость:

Даты замерзания и откола льда, а также его протяженность, могут значительно варьироваться из года в год из-за колебаний температуры воздуха и поверхности моря, а также штормовой активности.

На режим морского льда в акватории моря Лабрадор влияют изменения температуры воздуха и поверхности моря, а также увеличение частоты штормов. Все эти изменения приводят к изменениям протяженности и продолжительности льда.

Виды льдов моря Лабрадор:

В Лабрадорском море в основном встречаются два основных типа морского льда: припайной лед и морской лед. Припайный лед образуется непосредственно на суше и простирается в море, в то время как морской лед берет начало дальше на север и дрейфует на юг в регион.

- Припайный лед – это лёд, сформированный вдоль береговой линии и прикрепленный к ней.
- Морской лед – лед, образованный в открытой воде, и начавший дрейфовать под воздействием течений и ветра.

В Лабрадорском море на расширение морского льда влияют несколько ключевых факторов:

- Дрейф арктических льдов: значительная часть морского льда в Лабрадорском море происходит из Северного Ледовитого океана и дрейфует на юг через пролив Дэвиса.
- Местное образование льда: местные низкие температуры и ветры также могут способствовать образованию морского льда в Лабрадорском море, особенно вблизи побережья.
- Распространение и протяжённость континентального шельфа: шельфовая зона играет важную роль в распространении морского льда, поскольку припайный лед, как правило, концентрируется вдоль этих регионов.

Морской лед в Лабрадорском море является динамической особенностью, подверженной влиянию сезонных изменений и океанских течений. Северная и западная части моря обычно покрыты льдом с декабря по июнь, что служит важной средой обитания для морских животных, например, тюленей.

2. Прогнозы и их методы. Сверхдолгосрочное прогнозирование

2.1 Развитие прогнозирования

Прогноз в климатологии — это описание ожидаемого в будущем климата с учётом влияния естественных и антропогенных факторов.

Прогнозирование представляет собой научный процесс предвидения развития природных процессов, в частности атмосферных явлений. Попытки предсказания погоды сопровождают человечество на протяжении всей его истории, начиная с народных примет и наблюдений. Тем не менее, значительный прогресс в прогнозировании погоды достигнут только благодаря развитию синоптической метеорологии, которая дала возможность выявлять и исследовать основные компоненты атмосферной циркуляции: барические образования, воздушные массы, атмосферные фронты, струйные течения и другие важные элементы.

Первым важным этапом улучшения качества прогнозов стал период 1948–1955 годов, связанный с развитием радиозондирования. Получаемые данные позволили проводить трёхмерный анализ атмосферы, что дало возможность открыть и исследовать такие фундаментальные синоптические структуры, как высотные фронтальные зоны, струйные течения и стратосферная циркуляция.

Второй этап совершенствования прогнозов начался в середине 1960-х годов и продолжался до середины 1970-х, когда в метеорологическую практику были внедрены электронно-вычислительные машины (ЭВМ). Это позволило обрабатывать большие объёмы информации и внедрять гидродинамические модели атмосферы, существенно повысив точность прогнозов.

Третий этап, начавшийся в конце 1970-х годов и продолжающийся по настоящее время, связан с использованием спутниковых данных и интеграцией

глобальной информации в процесс составления прогнозов. Благодаря внедрению электронно-вычислительных машин (ЭВМ) точность краткосрочных прогнозов значительно выросла: за примерно 65 лет доля верных прогнозов увеличилась с 60 % до 92 %, что является важным достижением метеорологической науки и практики.

Однако ситуация с долгосрочными прогнозами (на месяц и сезон) остается менее оптимистичной. Такие прогнозы сталкиваются с большими трудностями из-за сложной нелинейной динамики атмосферы и ограниченной способности моделей точно предсказывать процессы при длительных временных интервалах. Поэтому точность долгосрочных моделей пока не достигла уровня краткосрочных прогнозов, и они требуют дальнейших научных исследований и развития вычислительных методов. За последние полвека их точность оставалась на уровне 60–65 %. Это вызывает вопрос: почему значительные достижения в краткосрочных прогнозах не оказали существенного положительного влияния на эффективность долгосрочных прогнозов?

Ответ связан с принципиальными различиями в физике атмосферных процессов на различных временных масштабах. Изменения температуры воздуха со временем, предсказанным в прогнозе, обусловлено тремя ключевыми факторами: переносом температуры воздухом (адвекцией), вертикальным теплообменом и внешним поступлением тепла в атмосферу. Первые два фактора являются адиабатическими и связаны исключительно с внутренним состоянием атмосферы и её начальным распределением метеорологических величин. Третий фактор — неадиабатический — учитывает приток тепла через верхнюю (космос) и нижнюю (поверхность Земли) границы атмосферы.

Численные исследования, направленные на определение вклада адиабатических и неадиабатических компонентов в формирование будущей температуры воздуха, показали, что при коротком горизонте прогноза (до 5

дней) на 80–100 % температуру определяют адиабатические процессы. Это свидетельствует о том, что для краткосрочных прогнозов достаточно иметь точные данные о начальных условиях атмосферы. В то же время, более долгосрочные прогнозы требуют учёта более сложных процессов, в том числе влияния внешних факторов и взаимодействия с океанической системой, что значительно усложняет их точность и надёжность.

2.2 Типы прогнозов и их заблаговременность

Прогноз погоды — это научно обоснованное предположение о будущем состоянии атмосферы на определённой территории и в определённый период времени. Прогнозы составляются для различных целей, сроков и пространственных масштабов, что отражается в их классификации.

Таблица 2. Классификация прогнозов по срокам.

Вид прогноза	Срок действия (заблаговременность)	Характеристика
Прогноз текущей погоды	0–2 часа	Описание текущей погоды и ближайших изменений
Сверхкраткосрочный прогноз	до 12 часов	Прогноз метеорологических параметров на ближайшие часы
Краткосрочный прогноз	12–72 часа (до 3 суток)	Прогноз на ближайшие дни
Среднесрочный прогноз	3–10 суток (72–240 часов)	Прогноз на период до 10 суток
Внутримесячный прогноз (повышенной заблаговременности)	10–30 суток	Прогноз на месяц, обычно в виде отклонений от климатических норм
Долгосрочный прогноз	1–24 месяца (30 суток – 2 года)	Прогноз на месяц, квартал, сезон, год; выражается в отклонениях от климатических величин
Прогнозирование климата	свыше 2 лет	Прогноз межгодовой, десятилетней и столетней изменчивости климата

Заблаговременность прогноза (см. таблица 2) - это период времени от момента выпуска прогноза или предупреждения до момента наступления прогнозируемого явления. Например, для штормовых предупреждений

заблаговременность - это время между передачей предупреждения и наступлением опасного явления погоды.

Чем больше заблаговременность, тем выше неопределённость прогноза. Краткосрочные прогнозы (до 3 суток) обычно наиболее точны, а долгосрочные и климатические - более вероятностные и менее детализированные.

В гидрометеорологии заблаговременность прогноза определяет его назначение и область применения. Например:

- Краткосрочные прогнозы (1–5 суток) используются для оперативного управления водными ресурсами, предупреждения о паводках и опасных явлениях.

- Долгосрочные прогнозы (более 10 суток) применяются для планирования в гидроэнергетике, сельском хозяйстве, транспорте и других отраслях экономики.

Классификация пространственно-временной изменчивости (Монина):

Закономерности колебаний наблюдаемых и прогнозируемых океанологических параметров представляют собой фундаментальное свойство динамики океанических процессов. В пространственно-временной изменчивости прогнозируемых океанологических рядов, согласно классификации Монина, выделяется семь характерных масштабов вариаций, соответствующих наиболее интенсивным колебаниям:

Мелкомасштабная изменчивость (временные масштабы — от долей секунды до нескольких часов; пространственные — от сантиметров до десятков метров) характерна для поверхностных и внутренних волн, турбулентных процессов и вертикальной микроструктуры океана. Поверхность океана практически всегда деформирована волнами высотой до 20–30 м, которые играют ключевую роль в перемешивании верхнего слоя воды, способствуя его гомогенизации. Вертикальная слоистая структура океанических вод является

основой формирования внутренних волн, возбуждаемых приливными силами, изменениями атмосферного давления, ветром и течениями. Турбулентность обеспечивает эффективный вертикальный обмен массой, импульсом и теплом между океаном и атмосферой.

Мезомасштабная изменчивость (от нескольких часов до суток; пространственные масштабы — от сотен метров до десятков километров) связана с приливными и инерционными колебаниями, а также суточными термическими колебаниями, обусловленными гравитационным воздействием Луны и Солнца, силами инерции и суточным ходом солнечной радиации. Этот масштаб характерен также для суточных вертикальных миграций планктона, достигающих в некоторых районах сотен метров.

Синоптическая изменчивость (временные интервалы — от суток до месяцев; пространственные — десятки-сотни километров) проявляется в виде крупномасштабных вихрей, волн Россби и меандров океанических течений. Основным фактором, формирующим синоптическую изменчивость, является накопительный эффект воздействия ветра и теплового обмена с атмосферой. Эта изменчивость отражается в колебаниях температуры, достигающих локально нескольких градусов.

Сезонные колебания (основной период — 12 месяцев и его гармоники: 6, 4, 3 и 2 месяца; пространственные масштабы — сотни и тысячи километров) обусловлены сезонными изменениями солнечной радиации, связанными с годовым движением Земли вокруг Солнца. Сезонная изменчивость проявляется в биологической продуктивности океана и годовых колебаниях температуры поверхности воды. В северо-западных районах Атлантического и Тихого океанов амплитуда годовых колебаний температуры поверхности достигает 16–20 °C.

Межгодовая изменчивость (несколько лет; пространственные масштабы — сотни и тысячи километров) отражает взаимодействие океана и атмосферы

на больших акваториях с изменениями от года к году. Примерами являются колебания положения и интенсивности течений Гольфстрим и Кюросио с периодом около 3,5 лет, квазисемилетние циклы явления Эль-Ниньо и перемещения тепловых аномалий в океанических циркуляциях.

Внутривековая изменчивость (десятилетние периоды; масштабы океанов) связана с климатическими колебаниями, охватывающими океан и атмосферу. Наиболее выраженными являются циклы продолжительностью 11, 30–35 и 50–60 лет.

Межвековая изменчивость (периоды в сотни лет и более; масштабы океанов) обусловлена значительными колебаниями тепло- и влагообмена в глобальных процессах взаимодействия океана и атмосферы. Она проявляется в виде медленных изменений климатических параметров, средних термохалинных характеристик и ледовых условий на обширных океанических акваториях.[1]

Для эффективного прогнозирования конкретных коротких временных рядов достаточно учитывать и описывать три основных типа факторов, влияющих на формирование каждого значения прогнозируемого ряда:

Долгосрочные факторы характеризуются периодом воздействия, значительно превышающим продолжительность наблюдений, а также систематической медленной эволюцией прогнозируемого параметра во времени.

Периодические факторы — проявляются в виде регулярно повторяющихся колебаний прогнозируемого ряда.

Случайные факторы — имеют произвольные временные масштабы и проявляются как хаотические, нерегулярные вариации.

При построении прогностического уравнения предполагается независимость каждого типа факторов, формирующих соответствующие

структурные компоненты изменчивости временных океанографических рядов. Таким образом, прогнозируемый ряд $X_{пр}$ может быть представлен в виде суммы трёх компонентов:

$$X_{пр} = Tr + П + С, \text{ где}$$

Tr — долговременная составляющая,

$П$ — периодическая,

$С$ — случайная.

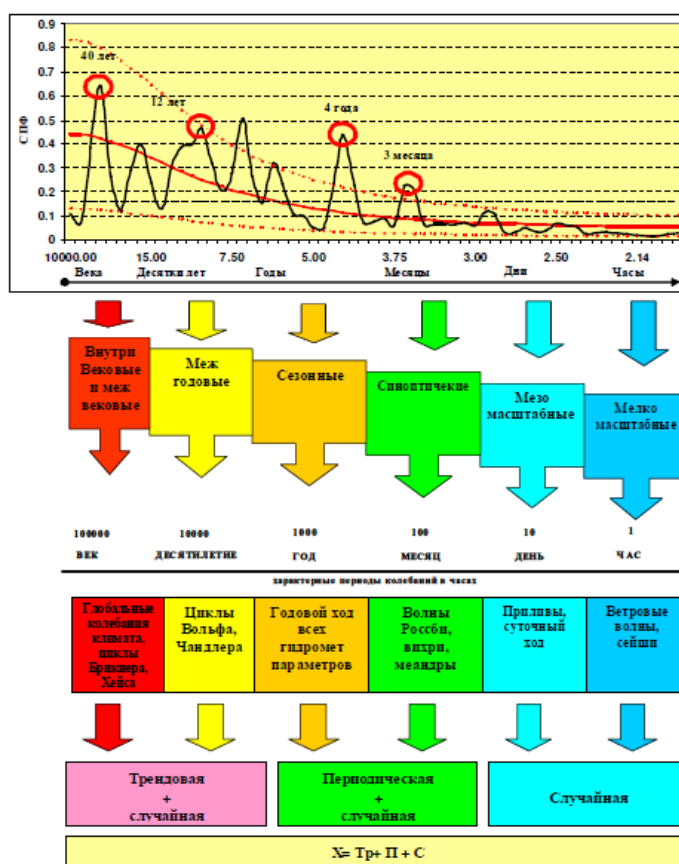


Рисунок 13. Классификация пространственно-временной изменчивости (Монина) [2]

2.3 Сверхдолгосрочное прогнозирование

Сверхдолгосрочное прогнозирование гидрометеорологических характеристик, предполагающее прогнозы на сроки от нескольких месяцев до

десятилетий и более, представляет собой одну из наиболее сложных и востребованных задач климатологии и прикладной океанологии. В отличие от краткосрочных и среднесрочных прогнозов, где основным источником информации является текущее состояние атмосферы и её динамика, сверхдолгосрочные прогнозы требуют учёта медленных процессов в системе «океан–атмосфера» и взаимодействия множества факторов на различных масштабах.

Ключевым вызовом в сверхдолгосрочном прогнозировании является высокая степень неопределённости, обусловленная как внутренней хаотичностью атмосферных процессов, так и влиянием внешних факторов — например, изменения солнечной активности, вулканической деятельности и антропогенного воздействия на климат. При этом значительную роль играет океан, который благодаря своей большой теплоёмкости и медленной динамике оказывает стабилизирующее влияние и формирует долговременные климатические колебания.

Для повышения качества сверхдолгосрочных прогнозов используются статистические методы, которые позволяют выявлять и моделировать устойчивые закономерности и циклы в исторических данных.

При средней заблаговременности прогнозов порядка 10–15 суток вклад начального состояния атмосферы и внешних тепловых притоков примерно одинаков и составляет по 50% каждый. Однако при прогнозировании температуры на месячном интервале влияние начальных условий значительно снижается и не превышает 10–15%, в то время как внешние тепловые притоки определяют до 85–90% изменчивости температуры. Следовательно, ключевой физической особенностью длительных изменений атмосферной циркуляции и погодных условий является их обусловленность воздействием внешних по отношению к атмосфере источников и стоков тепловой энергии.

Неадиабатические факторы, влияющие на колебания погоды, включают в себя не только внешние тепловые потоки, но и другие виды энергии, способные изменять термодинамические характеристики атмосферы. Например, извержения вулканов, выбрасывающие в верхние слои атмосферы значительное количество долгоживущих аэрозолей, могут уменьшать приток солнечной радиации к поверхности Земли и, соответственно, к атмосфере в целом.

Рассмотрим классификацию возможных внешних энергетических воздействий на атмосферу:

Космические факторы: вариации солнечной постоянной и корпускулярного излучения, связанные с изменениями солнечной активности; поглощение атмосферой меняющегося потока галактических космических лучей; гравитационные воздействия небесных тел; а также изменения параметров вращения Земли.

Земные факторы: аномалии температуры поверхности океанов и суши; положение границ морских льдов; сроки установления и схода снежного покрова, а также его южная граница; вулканическая активность.

Все перечисленные факторы способны либо усиливать, либо ослаблять приток энергии в атмосферу по сравнению с климатической нормой, а также аномально перераспределять её в пространстве. Интеграция этих факторов в системы долгосрочного прогнозирования представляет собой чрезвычайно сложную и комплексную задачу, решение которой находится на начальной стадии развития. В связи с этим нельзя ожидать быстрого прогресса в области долгосрочного прогнозирования. Для существенного повышения качества таких прогнозов необходимо разработать новые атмосферные модели, в которых неадиабатические факторы будут учтены в полном объёме.

Другая важная физическая особенность долгосрочных прогнозов связана с концепцией предсказуемости атмосферных процессов. Современные гидродинамические модели, являющиеся наиболее совершенными

физическими моделями атмосферы, способны достаточно точно прогнозировать поведение отдельных синоптических объектов (циклонов, антициклонов, фронтов, областей тепла и холода), наблюдаемых на ежедневных картах, на срок не более 5–7 суток. При увеличении горизонта прогнозирования ошибки моделей превышают уровень климатической изменчивости, что делает прогнозы практически бесполезными.

Эти временные рамки определяются как предел предсказуемости погоды с помощью моделей. Несмотря на дальнейшее совершенствование моделей, этот предел не превысит примерно двух недель, поскольку к этому времени атмосфера утрачивает память о своем начальном состоянии, которое служит основой для расчёта будущих изменений.

Таким образом, объекты долгосрочного прогнозирования на месячные и сезонные сроки не могут включать в себя процессы, наблюдаемые на срочных синоптических картах. Анализ движений атмосферы с использованием динамико-стохастического подхода показывает, что спектр атмосферных процессов можно разделить на высокочастотные и низкочастотные компоненты. Последние характеризуются временем жизни порядка одного-двух месяцев и проявляются в поле давления в виде ультрадлинных волн западно-восточного переноса. Фаза этих волн (географическое положение) меняется медленно, с периодами от нескольких недель до нескольких месяцев, формируя перемещающиеся очаги погодных аномалий, существующие в течение аналогичных временных интервалов.

Исследование именно этих циркуляционных объектов способно значительно повысить предел предсказуемости состояния атмосферы. Результаты исследований предсказуемости длительных атмосферных процессов позволяют сделать важный вывод для методологии долгосрочного прогнозирования: при прогнозах на месяц и сезон маловероятно предсказать погодные условия на каждый день прогностического периода, поскольку они зависят от индивидуальных синоптических объектов, непредсказуемых в

данных временных масштабах. Следовательно, целесообразно прогнозировать усреднённые метеорологические характеристики (за декаду, месяц или сезон), соответствующие временным масштабам существования сверхдлинных волн.

Третья физическая особенность долгосрочных прогнозов заключается в том, что любые продолжительные аномалии погоды являются следствием формирования аномальных режимов атмосферной циркуляции. Следовательно, успешность долгосрочного прогнозирования засух, периодов избыточного увлажнения, сильных морозов или оттепелей в первую очередь зависит от корректного прогноза барического поля атмосферы, степени зональности или меридиональности циркуляции, а также периодов и фаз длинных волн западно-восточного переноса. Таким образом, анализ общей циркуляции атмосферы является необходимым компонентом долгосрочного прогноза погоды. [3]

2.4 Методы долгосрочного прогнозирования

Гидродинамические методы основаны на решении системы уравнений, описывающих динамику атмосферы и океана, что позволяет использовать наиболее полные физические модели процессов. Статистические методы, в свою очередь, опираются на выявление закономерностей и зависимостей в исторических данных, используя математические модели для экстраполяции будущих состояний.

Таким образом, классификация методов прогнозирования отражает развитие различных научных направлений и позволяет применять комплексный подход к долгосрочному прогнозированию атмосферных и морских процессов.



Рисунок 14. Классификация методов морских прогнозов

Гидродинамические методы прогнозирования базируются на решении уравнений гидротермодинамики. При аналитическом подходе для прогнозов используют упрощённые уравнения, являющиеся приближенными решениями исходных систем. Однако чаще всего прогнозы строятся с помощью численных методов, которые решают системы дифференциальных уравнений с применением конечно-разностных схем.

Статистические методы опираются на эмпирические уравнения прогноза, которые в рамках статистико-вероятностного подхода отражают выявленные причинно-следственные связи, обнаруженные при анализе временного ряда одного прогнозируемого параметра. Физико-статистический подход предполагает создание статистического уравнения прогнозирования, основанного на эмпирическом описании изменений параметра в будущем, учитывая совокупное влияние нескольких физических факторов из прошлого.

1. Аналитические методы

Синоптические методы основаны на анализе закономерностей в трансформации и последовательной смене крупных масштабов атмосферной циркуляции. В основе этих методов лежит принцип аналогии, согласно которому будущее развитие атмосферных процессов прогнозируется на основе

сходства с их развитием в прошлом при аналогичных условиях. В настоящее время синоптические методы остаются основным инструментом оперативного долгосрочного прогнозирования.

2. Численные методы

Гидродинамические методы основаны на численном решении системы гидродинамических уравнений атмосферы, с учётом изменяющихся во времени граничных условий и влияния внешних факторов. Теоретически эти методы являются наиболее перспективными, поскольку позволяют использовать наиболее полные физические модели атмосферы. Однако интегрирование таких уравнений на длительные периоды с учётом динамично меняющихся внешних воздействий представляет собой чрезвычайно сложную задачу, и на сегодняшний день эти методы реализуются преимущественно в виде численных экспериментов.

В основе гидродинамических методов лежат уравнения гидротермодинамики. При аналитическом подходе используются упрощённые решения исходных уравнений, однако на практике чаще применяются численные методы, реализованные с помощью конечно-разностных схем.

3. Статистико-вероятностные методы

Статистические методы основаны на выявлении закономерностей во временной динамике гидрометеорологических рядов и полей, преимущественно их циклических и квазипериодических компонентов. При этом физические причины возникновения циклов обычно не рассматриваются, а прогноз строится с помощью формальной математической экстраполяции, исходя из поведения параметров в прошлом. В оперативной практике эти методы также играют вспомогательную роль.

4. Физико-статистические методы

Эти методы используют статистические связи между будущими погодными аномалиями (предиктантами) и физически обоснованными факторами (предикторами), влияющими на атмосферные процессы. Предикторы могут определяться как на основе качественного анализа влияния различных факторов на циркуляцию атмосферы, так и с помощью гидродинамических уравнений, описывающих физику формирования прогнозируемых величин. В практической деятельности физико-статистические методы, как правило, используются в качестве вспомогательных методов. [4]

2.5 Использование статистического метода в сверхдолгосрочном прогнозировании и его этапы

Статистические методы опираются на эмпирические прогностические уравнения, которые отражают причинно-следственные связи, выявляемые в ходе статистического анализа временных рядов прогнозируемых параметров. Физико-статистическая методология предполагает построение прогностических уравнений на основе эмпирического описания изменчивости параметра как результата совокупного влияния нескольких физически обоснованных факторов, наблюдаемых в прошлом.

Этот обзор демонстрирует многогранность и комплексность подходов к долгосрочному прогнозированию погоды, а также подчёркивает необходимость интеграции различных методов для повышения точности и надёжности прогнозов

1 этап. Предпрогнозный анализ.

Прогнозируемый ряд разбивается на элементарные компоненты: трендовую, периодическую и случайную.

Методика анализа: Визуальный, первичный, спектральный анализ, фильтрация временного ряда, корреляционный

Результат: Компонентная модель прогнозируемого ряда. Оценки значений компонентов, их статистическое описание.

2 этап. Прогнозирование компонентов.

Формируются прогностические уравнения трендовых, периодических и случайных компонентов. Оценивается значимость коэффициентов и адекватность уравнений.

Методика анализа: Анализ тренда, Фурье-анализ, авторегрессионный анализ.

Результат: Оценки коэффициентов тренда, Фурье, авторегрессии. Оценки качества описания компонентов полученными уравнениями.

3 Этап. Составление итогового прогноза.

Объединение прогнозируемых значений компонентов. Методическое прогнозирование, проверка качества прогнозов. Выбор оптимального прогностического уравнения

Методика анализа: Первичный и корреляционный анализы рядов ошибок прогнозирования.

Результат: Методические и независимые прогнозы ряда $X_{пр}$ с доверительными интервалами. Оценки критериев точности, эффективности, практического применения.

Прогнозируемые значения океанологического временного ряда представляются комбинацией значений трех основных компонент трендовой, периодической и случайной: то есть: $X_{пр}(t) = T_p(t) + \Pi(t) + C(t)$

Под детерминированной составляющей временного ряда X понимают числовую последовательность, элементы которой вычисляются по определенному правилу как функция времени $X(t)$. В свою очередь, детерминированная составляющая может содержать трендовую и периодическую структурные компоненты. Исключив ее из данных, мы получим ряд, который представляет собой нерегулярные, хаотические колебания и называется случайной составляющей. Такое представление прогнозируемого ряда называется прогностической.

Трендовая компонента $Tr(t)$ представляет собой плавное устойчивое систематическое медленное изменение процесса во времени, обусловленное действием долговременных факторов. В качестве наглядного примера влияния таких факторов в гидрометеорологии можно назвать потепление климата, которое обуславливает рост температуры воды, таяние льдов, подъем уровня океана.

Периодическая компонента $P(t)$, описывающая периоды относительного подъема и спада значений прогнозируемого ряда, состоит из многократно повторяющихся устойчивых периодических колебаний постоянной амплитуды, фазы и периода. Периодические изменения $P(t)$ принято чаще всего считать результатом воздействия астрономических и космофизических факторов детерминированными (как правило, периодическими обусловленными силами – строго гравитационными, радиационными, тепловыми, геомагнитными, возникающими под действием вращения Земли, планет и Солнца). Подобные колебания прослеживаются в прогнозируемых рядах уровня, течений, температуры, ледовитости. Например, ряд ежечасных значений уровня моря, может прогнозироваться как детерминированная периодическая компонента, состоящая из двух гармонических колебаний с периодами 12 и 24 ч, и объясняться влиянием приливообразующих сил Луны. Случайная компонента $S(t)$ ряда отражает совокупное воздействие факторов случайного характера – прежде всего турбулентности различных масштабов. Она проявляется в

присутствии нерегулярных, хаотических вариаций прогнозируемого ряда и может иметь разнообразную структуру: от несвязных колебаний в виде белого шума до весьма сложных инерционных и циклических колебаний. Временной ряд, в котором преобладают хаотические колебания, которые следует отнести к случайной компоненте. Статистическое описание такой изменчивости возможно на основе расчета и анализа автокорреляционной функции (АКФ), а прогнозирование – с помощью уравнений авторегрессии. АКФ – автокорреляционная функция, расчет и анализ которой позволяет провести статистическое описание хаотических колебаний, относящихся к случайной компоненте.

Таблица 3. Этапы прогнозирования

№ п/п	Этап	Содержание	Методика анализа	Результат
1	Предпрогнозный анализ	Прогнозируемый ряд разбивается на элементарные компоненты: трендовую, периодическую и случайную	Визуальный, первичный, корреляционный, спектральный анализ, фильтрация временного ряда	Компонентная модель прогнозируемого ряда. Оценки значений компонентов, их статистическое описание
2	Прогнозирование компонентов	Формируются прогностические уравнения трендового, периодического и случайного компонентов. Оценивается значимость коэффициентов и адекватность уравнений	Анализ тренда, Фурье-анализ, авторегрессионный анализ	Оценки коэффициентов тренда, Фурье, авторегрессии. Оценки качества описания компонентов полученными уравнениями
3	Составление итогового прогноза	Объединение прогнозируемых значений компонентов. Методическое прогнозирование, проверка качества прогнозов. Выбор оптимального прогностического уравнения	Первичный и корреляционный анализы рядов ошибок прогнозирования	Методические и независимые прогнозы ряда $X_{\text{пр}}$ с доверительными интервалами. Оценки критериев точности, эффективности, практического применения

Последовательность предпрогнозного анализа ряда и его этапы.

- 1) Общий анализ прогнозируемого ряда: Визуальный графический анализ, расчёт первичных статистик, функции распределения.
- 2) Выявление структурных компонент: Построение АКФ и СПФ, оценка статистической предсказуемости, определение набора структурных компонент.

3) Выделение структурных компонент: Полосовая фильтрация, оценка вклада дисперсии каждой структурной компоненты в дисперсию исходного ряда.

4) Сравнительный анализ и интерпретация компонент: Определение типа каждой структурной компоненты и выбор математической интерпретации изменчивости для каждой компоненты.

5) Формулировка компонентной модели: Определение процесса взаимодействия компонент друг с другом (аддитивный или мультипликативный).

Теперь рассмотрим подробнее все этапы анализа прогнозируемого ряда.

Общий анализ прогнозируемого ряда:

Первый шаг на пути получения прогностической модели прогнозируемого ряда – его визуальный анализ. При этом необходимо выявить характерные элементы изменчивости ряда, которые позволяют судить о статистической структуре и наличии компонент: трендовой, периодической, случайной. Далее подтверждаем первое впечатление от визуальных оценок при помощи первичных статистик. Первичные статистики и эмпирическая гистограмма позволяют оценить характер распределения значений в исходном ряду по диапазонам изменчивости, увидеть количество экстремальных значений (выбросов) и сделать предварительные выводы об успешности предсказания ряда.

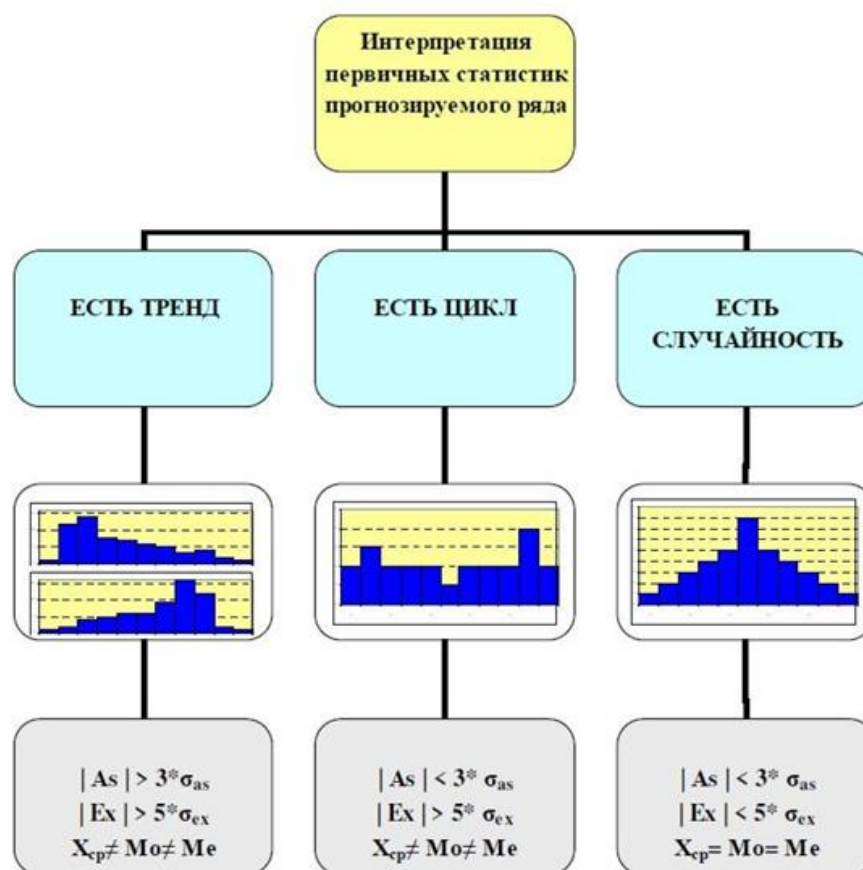


Рисунок 15. Интерпретация первичных статистик прогнозируемого ряда

Предварительная оценка статистической предсказуемости прогнозируемого ряда в целом делается на основе результатов его корреляционно-спектрального анализа – вычисленных значений и интерпретации графиков автокорреляционной функции (АКФ) и функции спектральной плотности (СПФ).

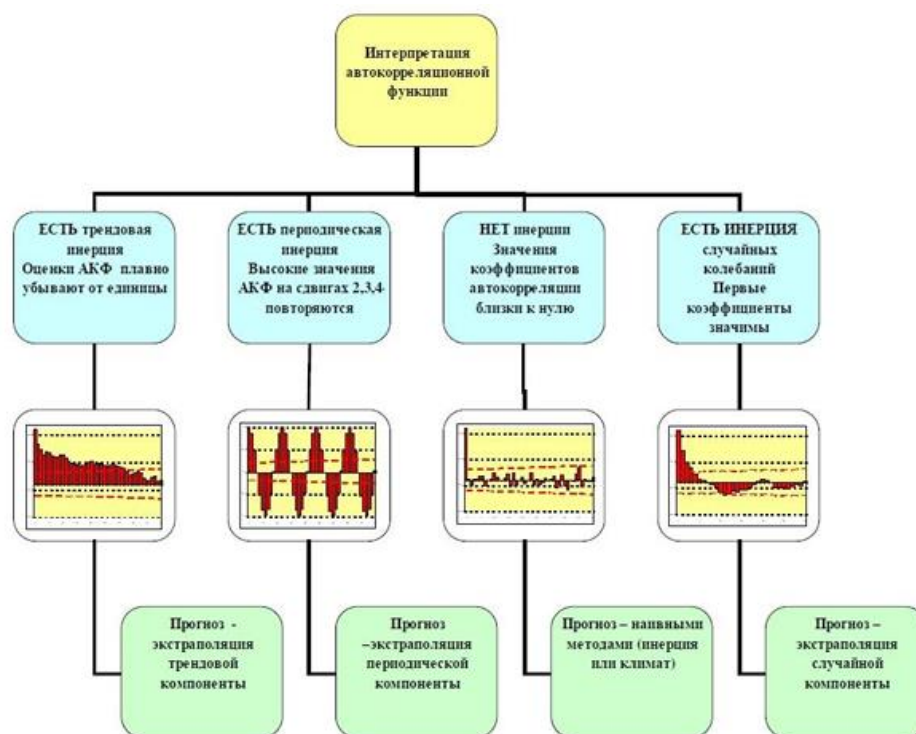


Рисунок 16. Интерпретация АКФ прогнозируемого ряда

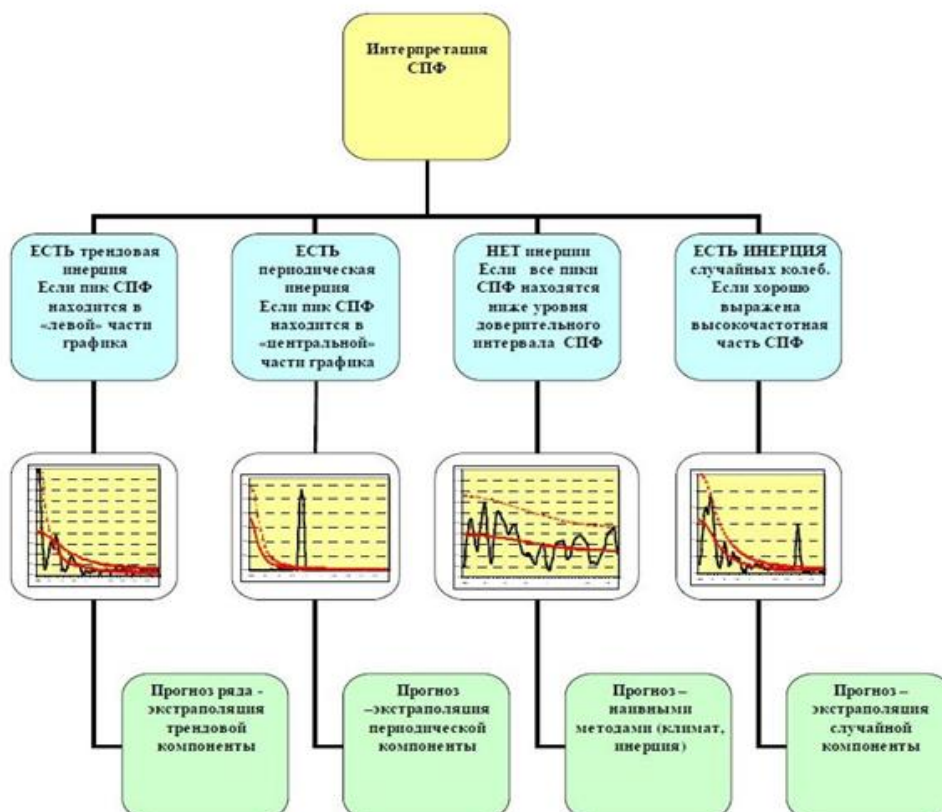


Рисунок 17. Интерпретация СПФ прогнозируемого ряда

2.6 Критерии качества и оценка эффективности метода прогнозов

Полученные прогностические значения надо в первую очередь критически рассмотреть на отсутствие в них противоречий известным фактам и сложившимся представлениям о характере развития прогнозируемого процесса, а только затем переходить к выполнению формальных процедур оценки точности прогнозов. Наиболее качественный метод прогноза определяется следующими комплексными характеристиками: - максимальной адекватностью; - максимальной точностью; - максимальной эффективностью.

Каждая характеристика оценивается в результате расчета нескольких количественных критериев, которые с разных сторон описывают успешность исследуемого метода прогнозов. На основе расчета и сравнения отдельных критериев формируется общий вывод об уровне качества метода прогноза и о возможности его практического применения.

Оценка эффективности позволяет точно определить, какой метод нельзя применять на практике для прогнозирования заданного океанологического временного ряда. Оценить практическую применимость метода на основе эффективности можно с помощью таблицы.

Таблица 4. Оценка метода эффективности

Эффективность $\mathcal{E}$, %	Оправдываемость	Применимость
$\mathcal{E} > 10$ (хорошая)	Оправдываемость метода лучше, чем у инерционного прогноза	Рекомендуется практическое использование метода
$0 < \mathcal{E} < 10$ (удовлетворительная)	Оправдываемость метода лучше, чем у климатического, но хуже, чем у инерционного прогноза	Возможно практическое использование метода после корректировки
$\mathcal{E} < 0$ (неудовлетворительная)	Оправдываемость метода хуже, чем у климатического прогноза	Запрещено практическое использование метода

Если сформулированный метод прогнозирования имеет оправдываемость меньше, чем климатический, то для данного ряда его не имеет смысла применять на практике вообще. Необходимо радикально пересмотреть используемое прогностическое уравнение на основе анализа ошибок методического прогнозирования.

Если метод прогнозирования имеет оправдываемость выше климатического метода, но ниже инерционного метода, то он считается недостаточно эффективным, но перспективным для дальнейшего усовершенствования и возможного практического применения. Требуется провести корректировку коэффициентов прогностического уравнения (увеличить порядок уравнения авторегрессии, дополнительно учесть периодическую гармонику). Если в результате проведенного анализа качества прогностического уравнения и методических прогнозов получен точный, адекватный, эффективный метод прогноза, то можно признать, что достигнута главная цель всего проводимого исследования и найден метод прогнозирования, применимый в практической оперативной работе. [5]

3. Аналитическая часть

В данной работе будут рассмотрены следующие временные ряды:

- Среднегодовая температура поверхности моря Лабрадор 1854-2023 гг.
- Среднегодовая температура атмосферы моря Лабрадор 1949-2023 гг.
- Среднегодовое атмосферное давление моря Лабрадор 1949-2023 гг.
- Площадь распространения морского льда в акватории моря Лабрадор 1979-2017 гг.

3.1 Анализ среднегодовой температуры поверхности моря Лабрадор

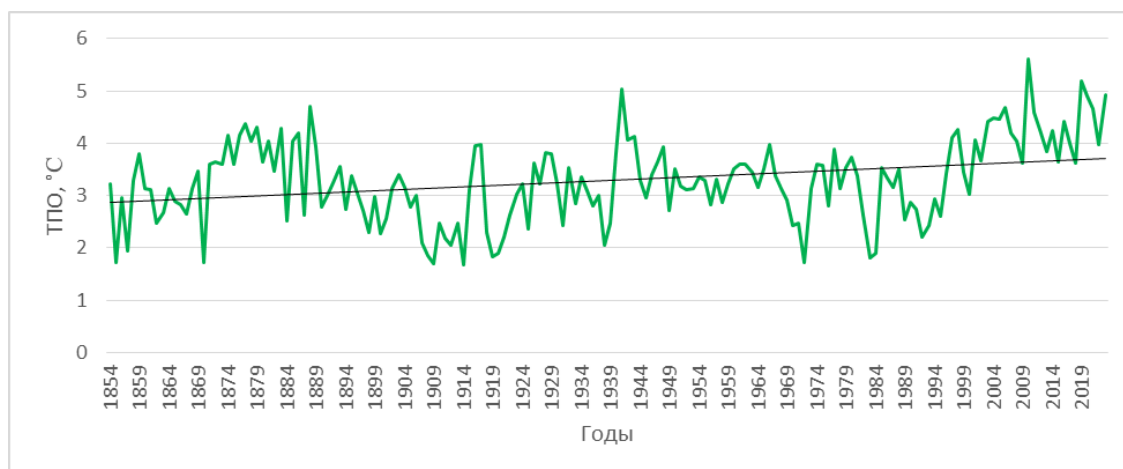


Рисунок 18. График изменения среднегодовой ТПО моря Лабрадор за январь 1854-2023 гг.

Анализируя график изменения температуры поверхности моря Лабрадор можно сказать, что он имеет сложную структуру в виде нерегулярных и хаотических колебаний. Максимальное значение зафиксировано в 2010 году и составляет $5,6^{\circ}\text{C}$. Минимальное значение зафиксировано в 1914 году и равнялось $1,67^{\circ}\text{C}$. Среднее значение температуры поверхности моря Лабрадор за период с 1854 по 2023 равняется $3,28^{\circ}\text{C}$.

Тренд исследуемого ряда является положительным и ярко выраженным.

Таблица 5. Первичная статистика по среднегодовой ТПО моря Лабрадор 1854-2023 гг.

ТПО, °C	
Среднее	3.281662
Стандартная ошибка	0.05982
Медиана	3.262175
Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0.779962
Дисперсия выборки	0.60834
Экссесс	-0.09326
Асимметричность	0.114284
Интервал	3.945713
Минимум	1.674446
Максимум	5.620159
Сумма	557.8826
Счет	170

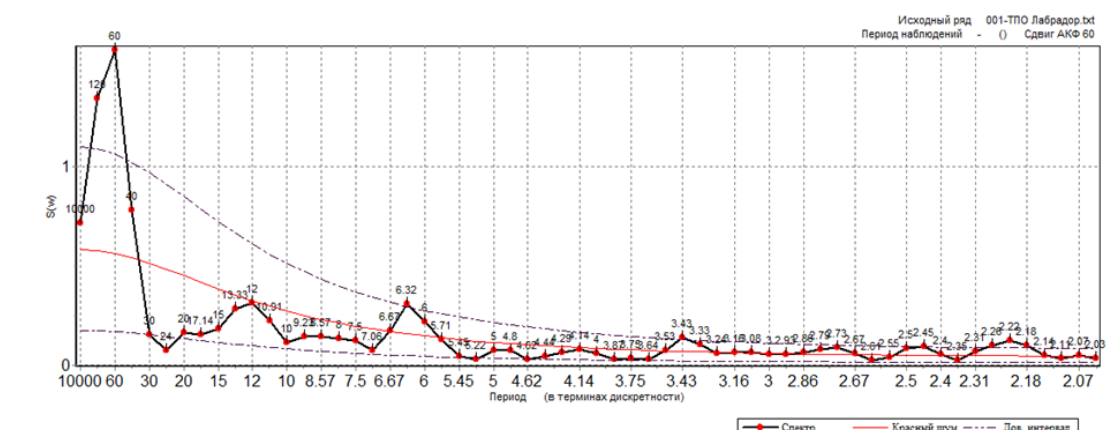


Рисунок 19. Функция распределения спектральной плотности по среднегодовой ТПО моря Лабрадор 1854-2023 гг.

Функция распределения спектральной плотности имеет сложную структуру. Количество максимумов (пиков) функции спектральной плотности равно 10, и они относятся к внутривековым и межгодовым изменчивостям.

К внутривековым относятся максимумы со значениями 60, 20 и 12 лет, которые в свою очередь будут относиться к циклам солнечной активности и колебаний климата. Первое значение можно отнести к циклу, связанному с колебаниями климата на планете, одновременно охватывающий океан и

атмосферу. 20 и 12 лет будут приближены к классическому циклу солнечной активности, характеризующегося звёздными вспышками.

К межгодовой изменчивости относятся пики со значениями 8, 6, 5, 3, 2,5 и 2 года. Они как правило будут описывать колебания во взаимодействии атмосферы и океана, действие энергоактивных зон в океане, взаимодействие течений, перемещение тепловых аномалий по океаническим круговоротам, смену периодов засухи и наводнений.

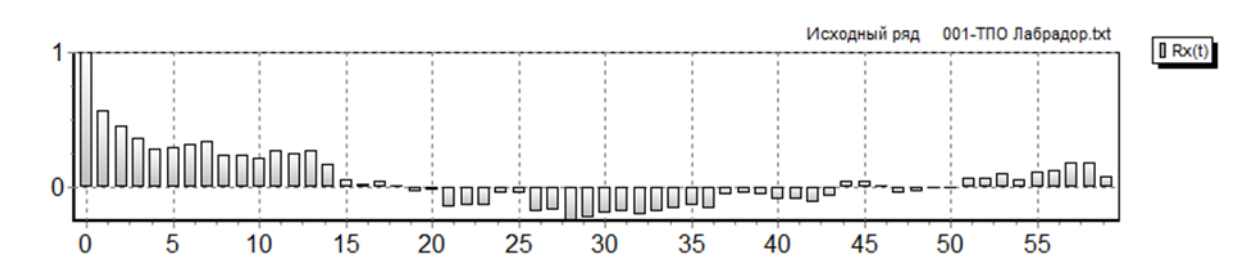


Рисунок 15. Автокорреляционная функция по среднегодовой ТПО моря Лабрадор 1854-2023 гг.

Анализируя график АКФ можно сказать, что в данном случае процесс является инерционным и присутствует значимый тренд, так как радиус корреляции равен 18. Тип процесса по большей части напоминает «красный шум», который характеризуется высокой инерционностью и отражает в исходном ряду периодичности сравнимым с длиной ряда или большей длины.

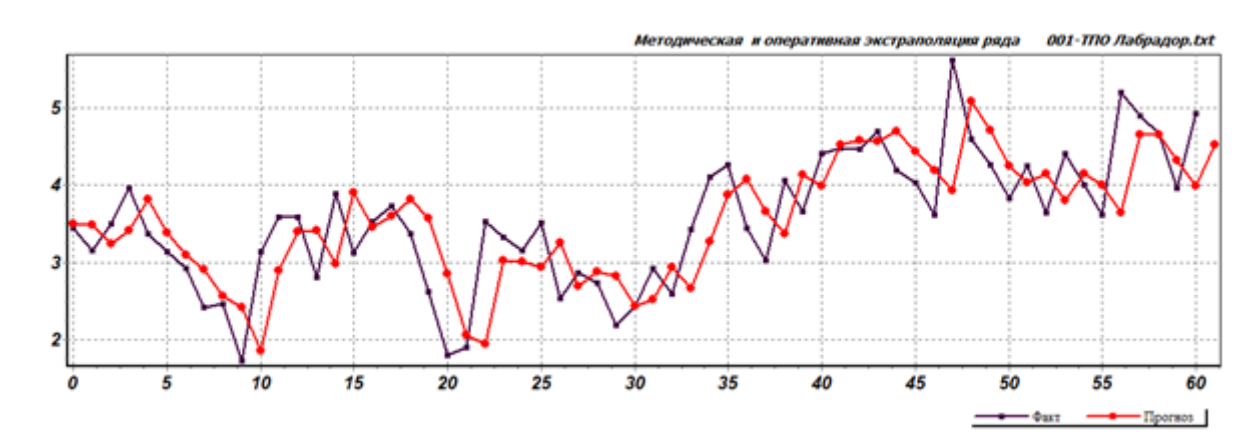


Рисунок 21. График автопрогноза по среднегодовой ТПО моря Лабрадор 1854-2023 гг.

Таблица 6. Таблица эффективности прогноза ТПО моря Лабрадор 1854-2023 гг.

Эффективность							
Метод	Надёжность	ЗАБЛАГОВРЕМ.	Средн.оши	Дисперс.оши	Опр. ЗНАК	Опр. 0.67	Опр. 0.80
Факт	0	3000	0	0	100	100	100
Климат	0.9836	0	-0.2731	0.6919	65.5738	47.541	50.8197
Инерция	0.6431	2.9148	-0.0217	0.4524	73.7705	63.9344	67.2131
Байес	0.6036	3.2456	-0.0764	0.4246	73.7705	65.5738	72.1311
Дин-Стат	0.8389	1.6442	-0.072	0.5901	65.5738	57.377	68.8525
Дин-Стох	0.553	3.7305	-0.083	0.389	73.7705	67.2131	73.7705
АР-1	0.583	3.4337	-0.1391	0.4101	73.7705	59.0164	68.8525
АР-2	0.5745	3.5152	-0.133	0.4041	72.1311	59.0164	68.8525
АР-3	0.5718	3.5411	-0.1288	0.4022	72.1311	60.6557	67.2131
Фурье	0.6087	3.2006	-0.441	0.4282	70.4918	50.8197	55.7377
Сред.компл.	0.5638	3.6201	-0.152	0.3966	75.4098	57.377	70.4918
Регр.компл.	0.5497	3.7653	-0.0205	0.3867	77.0492	63.9344	75.4098

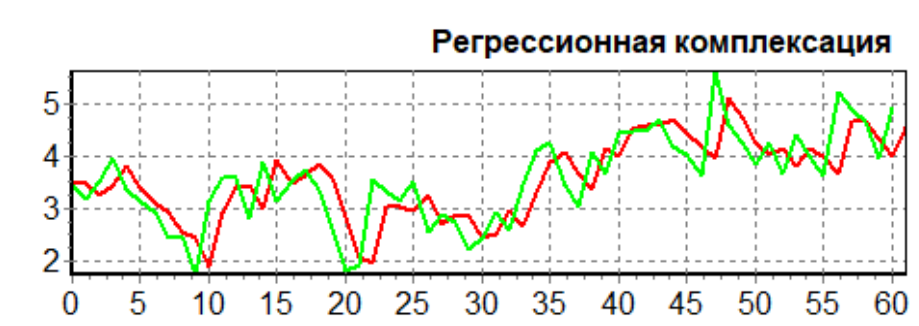


Рисунок 22. График показателя по среднегодовой ТПО моря Лабрадор 1854-2023 гг. (метод регрессионной комплексации)

Итоговый прогноз	
Значение	Знак
4.5297	77.0492
+/-	0.67 G
Сигма	63.9344
0.78	0.8 G
	75.4098

Для прогноза	
2024	4.547704

Рисунок 23. Итоговый прогноз и фактическое значение по среднегодовой ТПО моря Лабрадор 1854-2023 гг.

Анализируя графики прогноза и таблицу эффективности можно сделать следующий вывод: Лучше всего временной ряд ТПО моря Лабрадор с периодом 1854-2023 описывает метод регрессионной комплектации. Так как его заблаговременность по сравнению с другими методами самая высокая и равняется 3,77. Что касается оправдываемости прогноза, то его значение выше значения климатического метода что говорит о более качественном прогнозе данным методом.

Сравнивая итоговый прогноз на 2024 год с фактическим значением можно сказать, что результат прогноза максимально приближен к фактическому значению и попадает в доверительный интервал.

Фактическое значение равно 4, 55°C, рассчитанное значение равно 4,53°C.

3.2 Анализ среднегодовой температуры воздуха моря Лабрадор

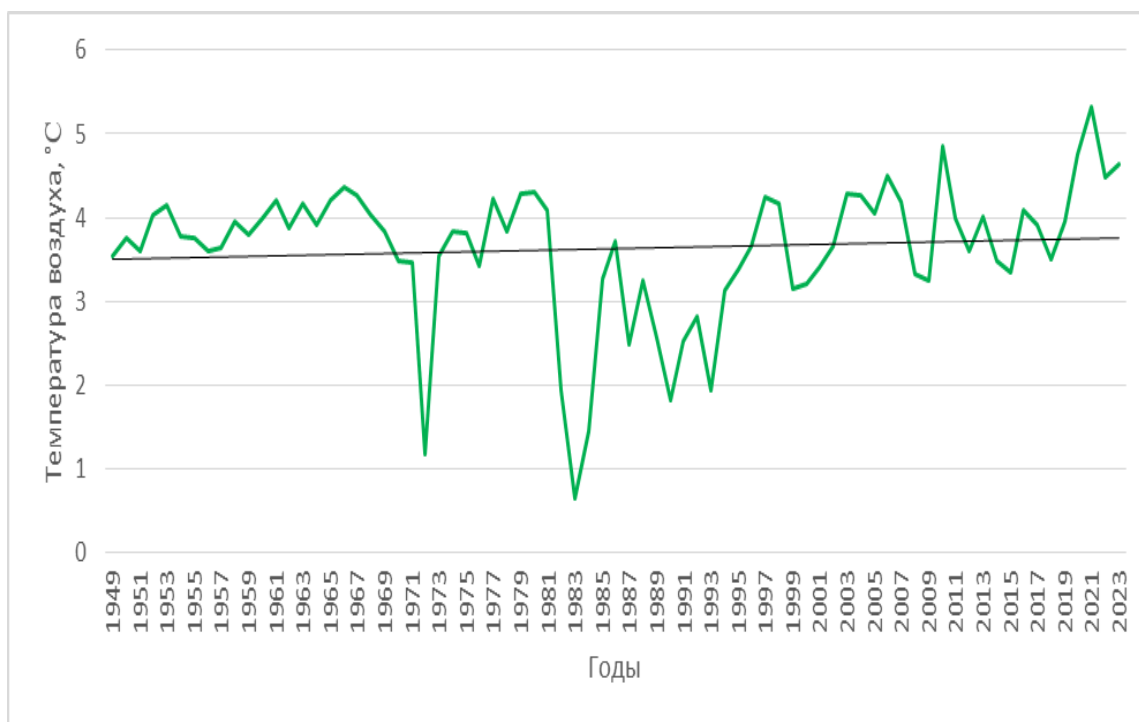


Рисунок 24. График изменения среднегодовой температуры воздуха моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Анализируя график изменения температуры над поверхностью океана можно сказать, что он имеет сложную структуру в виде нерегулярных и хаотических колебаний. Максимальное значение было достигнуто в 2021 году и составляло 5,32°C. Минимальное значение – в 1983 году и составляло 0,64°C. Среднее значение температуры поверхности моря Лабрадор за период с 1949 по 2023 равняется 3,63°C

Тренд исследуемого ряда положительный и достаточно выраженный.

Таблица 4. Первичная статистика среднегодовой температуры воздуха моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Т _а , °С	
Среднее	3.629375
Стандартная ошибка	0.095019
Медиана	3.804167
Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0.822889
Дисперсия выборки	0.677146
Экссесс	2.903863
Асимметричность	-1.45969
Интервал	4.685
Минимум	0.6375
Максимум	5.3225
Сумма	272.2031
Счет	75

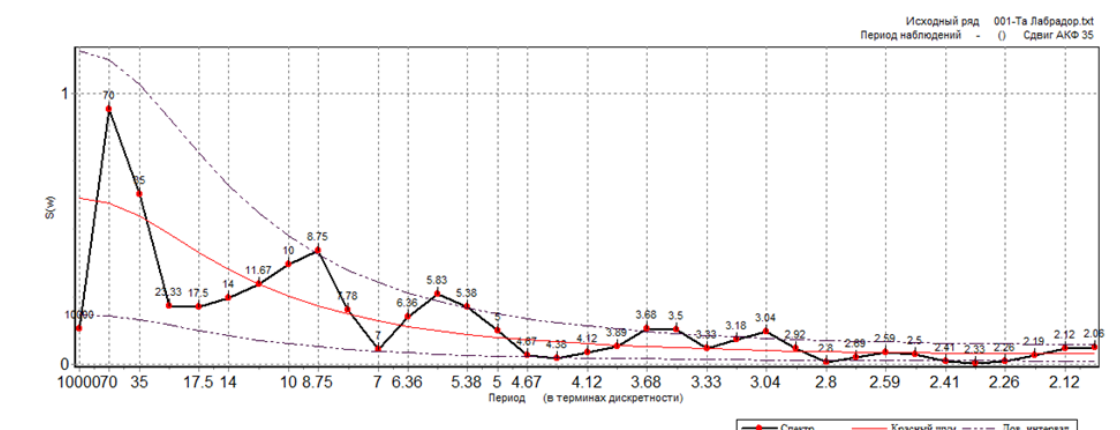


Рисунок 25. Функция распределения спектральной плотности среднегодовой температуры воздуха моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Функция распределения спектральной плотности имеет сложную структуру. Количество максимумов (пиков) функции спектральной плотности равно 5, и они относятся к внутривековым и межгодовым изменчивостям.

К процессам внутривековой изменчивости относится один пик со значением 70 лет, который можно отнести к циклу, связанному с колебаниями климата на планете, одновременно охватывающий океан и атмосферу.

К процессам межгодовой изменчивости относятся пики со значениями 8, 6, 4, 3. Первые два относятся к межгодовому циклу изменчивости, значение 6

очень близко к семялетнему циклу явления Эль-Ниньо и перемещения тепловых аномалий в океанических циркуляциях. Остальные два отражают колебания во взаимодействии атмосферы и океана, действие энергоактивных зон в океане, взаимодействие течений, перемещение тепловых аномалий по океаническим круговоротам, смену периодов засухи и наводнений.

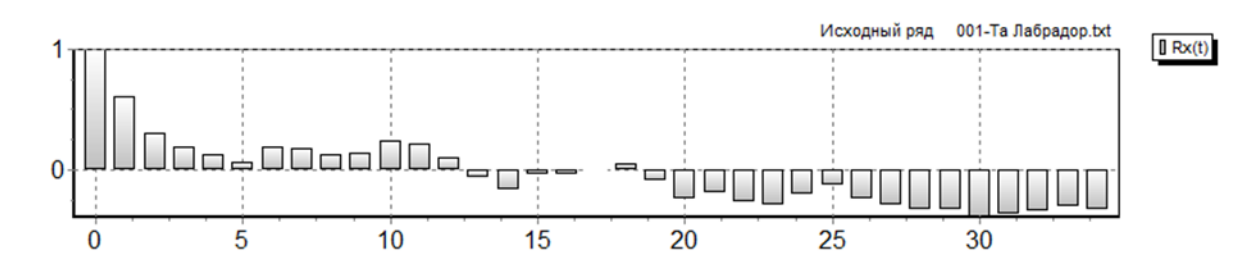


Рисунок 26. Автокорреляционная функция среднегодовой температуры воздуха моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Анализируя график АКФ можно сказать, что в данном случае процесс является инерционным и присутствует значимый тренд, так как радиус корреляции равен 13, значимый тренд отсутствует. Тип процесса по большей части напоминает «белый шум», который характеризуется случайным процессом.

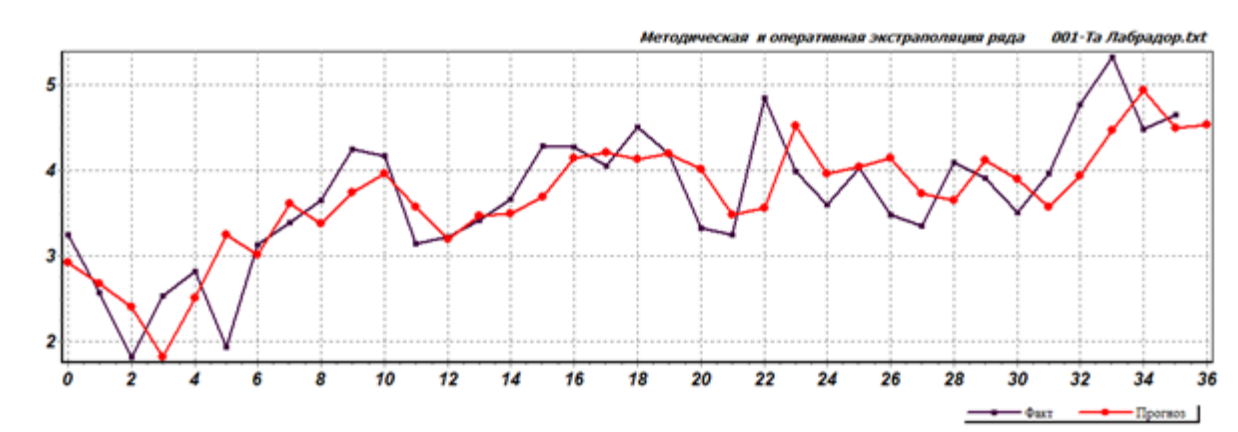


Рисунок 27. График автопрогноза среднегодовой температуры воздуха моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Таблица 5. Таблица эффективности прогноза среднегодовой температуры воздуха моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Эффективность							
Метод	Надёжность	ЗАБЛАГОВРЕ	Средн.оши	Дисперс.оши	Опр. ЗНАК	Опр. 0.67	Опр. 0.80
Факт	0	3000	0	0	100	100	100
Климат	0.9722	0.8374	-0.0569	0.5875	52.7778	55.5556	63.8889
Инерция	0.6454	2.8963	-0.0603	0.39	69.4444	52.7778	61.1111
Байес	0.57	3.5589	-0.0545	0.3444	69.4444	63.8889	66.6667
Дин-Стат	1.5077	0	-0.0054	0.9111	72.2222	63.8889	66.6667
Дин-Стох	0.5422	3.8442	-0.0594	0.3277	69.4444	61.1111	69.4444
АР-1	0.547	3.7937	-0.0565	0.3305	69.4444	66.6667	72.2222
АР-2	0.6196	3.1072	-0.052	0.3744	66.6667	63.8889	75
АР-3	0.6079	3.2074	-0.0502	0.3674	69.4444	66.6667	72.2222
Фурье	0.8127	1.7922	0.0359	0.4911	58.3333	58.3333	61.1111
Сред.компл.	0.6064	3.2211	-0.0399	0.3664	69.4444	61.1111	77.7778
Регр.компл.	0.4285	5.3709	-0.0249	0.259	75	72.2222	80.5556

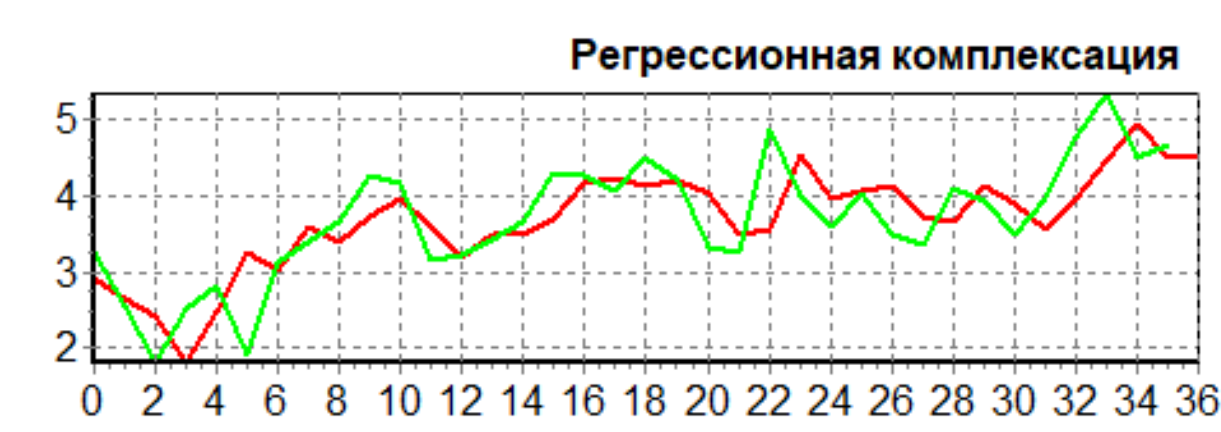


Рисунок 28. График показателя среднегодовой температуры воздуха моря Лабрадор 1949-2023 гг. (метод регрессионной комплексации)

Итоговый прогноз	
Значение	Знак
4.5246	75
+/-	0.67 G
Сигма	72.2222
0.8229	0.8 G
	80.5556

Для прогноза	
2024	4.631667

Рисунок 29. Итоговый прогноз и фактическое значение по среднегодовой температуре воздуха моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Анализируя графики прогноза и таблицу эффективности можно сделать следующий вывод: Лучшее временной ряд температуры воздуха над акваторией моря Лабрадор с периодом 1949-2023 года описывает метод регрессионной комплектации. Так как его заблаговременность по сравнению с другими методами самая высокая и равняется 5,37. Что касается оправдываемости прогноза, то его значение выше значения климатического метода что говорит о более качественном прогнозе данным методом.

Сравнивая итоговый прогноз на 2024 год с фактическим значением можно сказать, что результат прогноза максимально приближен к фактическому значению и попадает в доверительный интервал.

Фактическое значение равно 4,63°C, рассчитанное значение равно 4,53°C.

3.3 Анализ среднегодового атмосферного давление моря Лабрадор 1949-2023 гг.

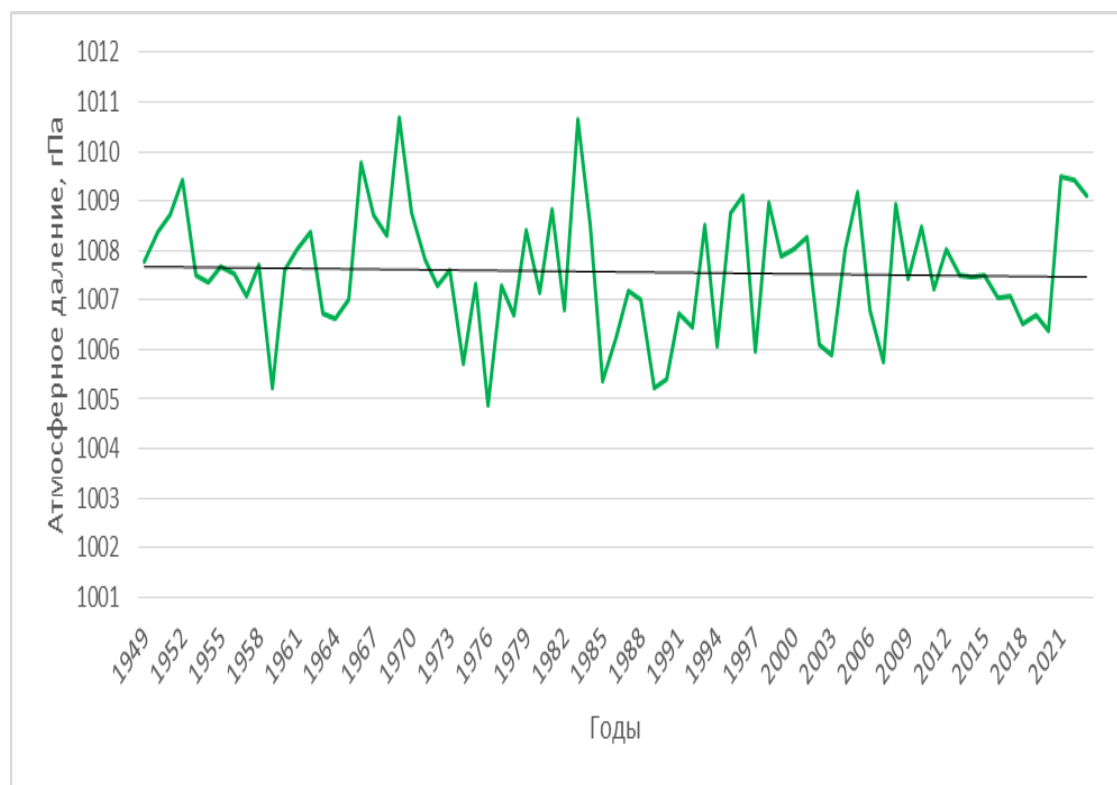


Рисунок 30. График изменения среднегодового атмосферного давление моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Анализируя график изменения атмосферного давления над акваторией моря Лабрадор можно сказать, что он имеет сложную структуру в виде нерегулярных и хаотических колебаний. Максимальное атмосферное давление было зафиксировано 1969 году и составляло 1010,7гПа. Минимальное атмосферное давление было в 1976 году и равнялось 1004,87гПа. Среднее значение атмосферного давления над поверхностью моря Лабрадор за период с 1949 по 2023 равняется 1007,57гПа.

Тренд исследуемого ряда является отрицательным и слабо выраженным.

Таблица 9. Первичная статистика среднегодового атмосферного давление моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Давление, гПа	
Среднее	1007.565
Стандартная ошибка	0.144973
Медиана	1007.517
Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	1.255502
Дисперсия выборки	1.576286
Экссесс	-0.15214
Асимметричность	0.121633
Интервал	5.830833
Минимум	1004.866
Максимум	1010.697
Сумма	75567.38
Счет	75

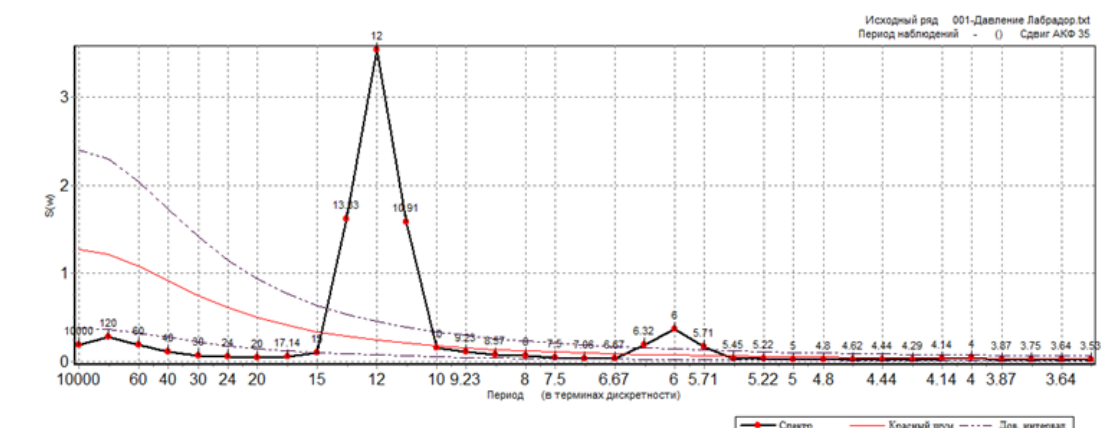


Рисунок 31. Функция распределения спектральной плотности среднегодового атмосферного давление моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Функция распределения спектральной плотности имеет сложную структуру. Количество максимумов (пиков) функции спектральной плотности равно 3, и они относятся к межвековой, внутривековым и межгодовым изменчивостям.

К процессам межвековой изменчивости относится один пик со значением 120 лет, которая обусловлена значительными колебаниями тепло- и влагообмена в глобальных процессах взаимодействия океана и атмосферы.

К процессам внутривековой изменчивости относится один пик со значением 12 лет, который можно отнести к циклу, связанному с колебаниями климата на планете, одновременно охватывающий океан и атмосферу.

К процессам межгодовой изменчивости относятся один пик со значением 6. Значение 6 очень близко к семилетнему циклу явления Эль-Ниньо и перемещения тепловых аномалий в океанических циркуляциях.

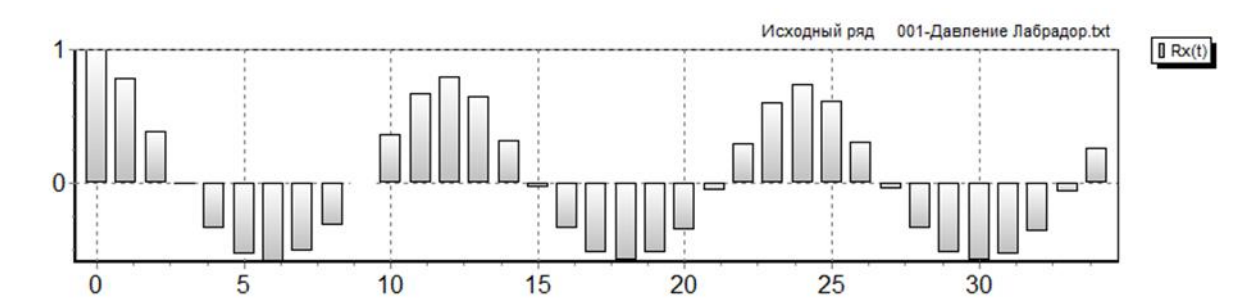


Рисунок 32. Автокорреляционная функция среднегодового атмосферного давление моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Анализируя график АКФ можно сказать, что в данном случае процесс является малоинерционным и значимого тренда не наблюдается, так как радиус корреляции равен 4. Тип процесса напоминает «квазициклический», параметры которого (период, амплитуда, фаза) испытывают нерегулярные изменения во времени в пределах некоторого диапазона.

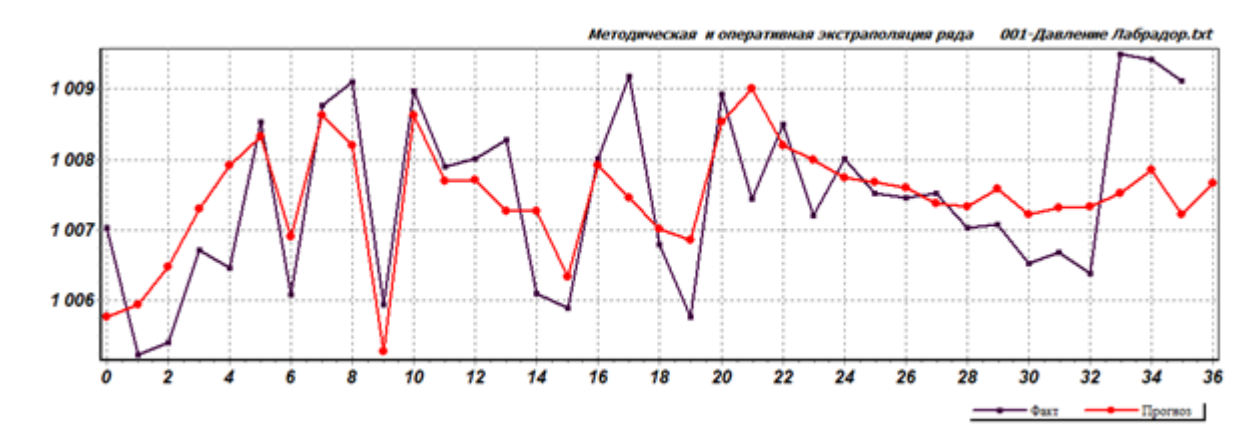


Рисунок 16. График автопрогноза среднегодового атмосферного давление моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Таблица 10. Таблица эффективности прогноза среднегодового атмосферного давления моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Эффективность							
Метод	Надёжность	ЗАБЛАГОВР	Средн.оши	Дисперс.оши	Опр. ЗНАК	Опр. 0.67	Опр. 0.80
Факт	0	3000	0	0	100	100	100
Климат	0.9722	0	0.1074	1.4552	41.6667	38.8889	50
Инерция	1.6087	0	-0.0537	2.4079	58.3333	50	50
Байес	1.1015	0	0.0169	1.6487	58.3333	55.5556	61.1111
Дин-Стат	1.2165	0	-0.1371	1.8207	52.7778	47.2222	52.7778
Дин-Стох	1.2837	0	-0.0144	1.9214	58.3333	55.5556	55.5556
АР-1	0.9735	0	0.0648	1.4571	58.3333	41.6667	50
АР-2	0.9928	0	0.0407	1.486	50	41.6667	52.7778
АР-3	1.0265	0	0.061	1.5365	41.6667	41.6667	50
Фурье	0.9062	0	0.6369	1.3564	50	44.4444	50
Сред.компл.	0.9718	0	0.0803	1.4545	55.5556	41.6667	50
Регр.компл.	0.5617	3.6411	-0.0029	0.8408	72.2222	61.1111	69.4444

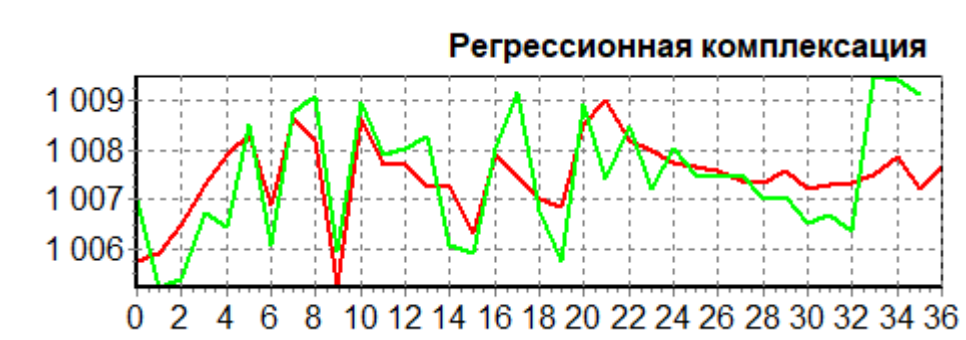


Рисунок 34. График показателя среднегодового атмосферного давления моря Лабрадор 1949-2023 гг. (метод регрессионной комплексации)

Итоговый прогноз	
Значение	Знак
1007.668	72.2222
+/-	0.67 G
Сигма	61.1111
1.2555	0.8 G
	69.4444

Для прогноза	
2024	1008.908

Рисунок 35. Итоговый прогноз и фактическое значение среднегодового атмосферного давления моря Лабрадор 1949-2023 гг.

Анализируя графики прогноза и таблицу эффективности можно сделать следующий вывод: Лучшее временной ряд атмосферного давления над акваторией моря Лабрадор с периодом 1949-2023 года описывает метод регрессионной комплектации. Так как его заблаговременность по сравнению с другими методами самая высокая и равняется 3,64. Что касается оправдываемости прогноза, то его значение выше значения климатического метода что говорит о более качественном прогнозе данным методом.

Сравнивая итоговый прогноз на 2024 год с фактическим значением можно сказать, что результат прогноза максимально приближен к фактическому значению и попадает в доверительный интервал.

Фактическое значение равно 1008,91гПа, рассчитанное значение равно 1007,67.

3.4 Анализ выхода на безледный режим акватории моря Лабрадор

Также построим статистическим методом прогноз выхода на безледный режим для моря Лабрадор [6]

Таблица 11. Расчеты линейного и нелинейного трендов ПРМЛ.

Год (сентябрь)	ПРМЛ	t	t ²	Линейный	Нелинейный
1979	47240	1	1	47287	45305
1980	34664	2	4	46766	45096
1981	42241	3	9	46244	44870
1982	52048	4	16	45722	44628
1983	75364	5	25	45200	44368
1984	38043	6	36	44679	44092
1985	37040	7	49	44157	43799
1986	38493	8	64	43635	43488
1987	27134	9	81	43113	43161
1988	19479	10	100	42592	42817
1989	42950	11	121	42070	42456
1990	32877	12	144	41548	42078
1991	35638	13	169	41026	41684
1992	55991	14	196	40505	41272
1993	54680	15	225	39983	40843
1994	31682	16	256	39461	40398
1995	42699	17	289	38939	39935
1996	85893	18	324	38418	39456
1997	48953	19	361	37896	38959
1998	37341	20	400	37374	38446
1999	37807	21	441	36852	37916
2000	40298	22	484	36331	37369
2001	39896	23	529	35809	36805
2002	31416	24	576	35287	36224
2003	29782	25	625	34766	35626
2004	30831	26	676	34244	35011
2005	25933	27	729	33722	34379
2006	26631	28	784	33200	33731
2007	25530	29	841	32679	33065
2008	27272	30	900	32157	32382
2009	24754	31	961	31635	31683
2010	33933	32	1024	31113	30967
2011	22612	33	1089	30592	30233
2012	21873	34	1156	30070	29483
2013	36788	35	1225	29548	28716
2014	20107	36	1296	29026	27932
2015	39088	37	1369	28505	27131
2016	23003	38	1444	27983	26313
2017	39591	39	1521	27461	25479

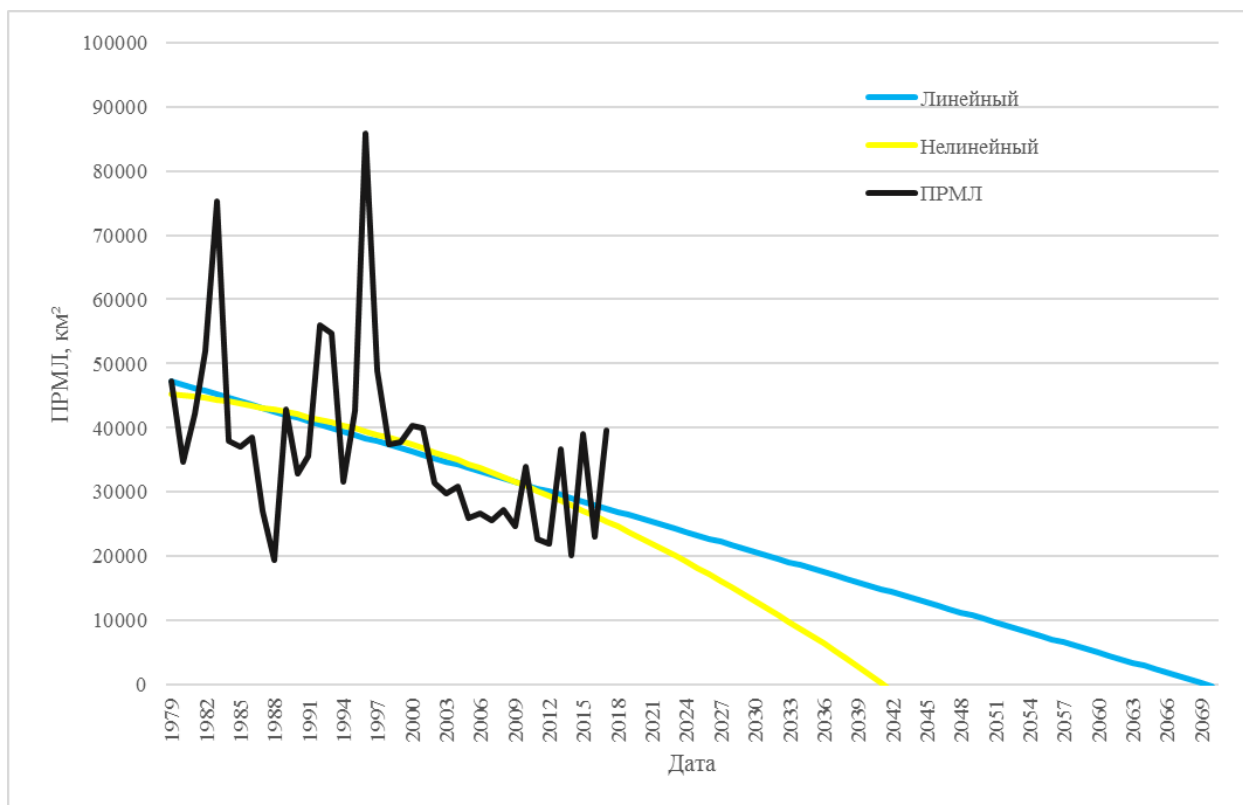


Рисунок 36. Линейный и нелинейный тренды площади распространения морского льда

Построив график, можно увидеть, что по прогнозу уравнению линейного тренда безледный режим наступит в 2070 году, а по уравнению квадратичного тренда тренду в 2042 году.

Таблица 12. Оценка устойчивости линейного тренда

Годы	Февраль (линейный тренд)				Дата выхода на безледный режим
	Хср	R ²	a1	Индекс тренда	
1979-2010	39200	0.13	-546.56	-43.22222	2061
1979-2011	38939	0.16	-587.06	-46.73622	2061
1979-2012	38679	0.19	-621.59	-49.81890	2057
1979-2013	38418	0.18	-576.54	-46.52244	2067
1979-2014	38157	0.21	-611.14	-49.65150	2059
1979-2015	37896	0.19	-556.82	-45.54944	2065
1979-2016	37635	0.21	-573.50	-47.23916	2063
1979-2017	37374	0.19	-521.74	-43.27542	2070

Подсчитав оценку устойчивости уравнения линейного тренда, можно сделать вывод, что при изменении длины ряда величина индекса тренда сильно менялась, что говорит нам об его неустойчивости и в свою очередь дает нам

неточный результат прогноза. Минимальная оценка равна -621.59 (2057 год), а максимальная -521.74 (2070 год). Степень неопределенности от неустойчивости уравнения линейного тренда составляет $\Delta = -99.85$, что не входит в диапазон относительной ошибки $\sigma = \pm 2.12$. Это свидетельствует нам о плохом качестве прогнозе.

У каждого периода разный прогноз выхода на безледный режим. Это связано с длиной ряда и его оценкой (a_1). Чем больше оценка, тем дата выхода на безледный режим более ранняя и наоборот.

Следующая часть была связана со сравнением прогноза. С сайта Columbia были скачаны данные о площади льда Лабрадорского моря (вместе с заливом Баффины) за сентябрь 2022 года. Результат усредненной площади, покрытой льдом, был равен 0.75%. После, нужно было сделать перевод из процентов в площадь. Зная площадь акватории ($841000 + 689000 = 1530000 \text{ км}^2$), мы с помощью пропорции, смогли рассчитать площадь занимаемой льдом.

$$1530000 - 100\%$$

$$X - 0.75\%$$

$$X = (841\,000 * 0.75) / 100 = 11475 \text{ км}^2$$

Площадь льда за сентябрь 2022 года по данным с сайта Columbia равнялась 11475 км².

По прогнозу уравнения линейного тренда безледный режим наступит в 2070 году, а по уравнению квадратичного тренду в 2042 году.

По прогнозу уравнения линейного тренда за сентябрь 2022 года площадь льда составляла 24853 км², а по прогнозу уравнения квадратичного тренда – 21051 км², а по расчету площади по данным с сайта Columbia равнялась 11475 км².

Сравнивая два прогноза с истинным значением, можно сделать вывод, что разница большая и в случае уравнения линейного тренда составляет - 13378 км², а в случае квадратичного - 9576 км².

Данные результатов говорят нам о том, что прогнозы не являются точными, что связано с многими факторами, которые не учитываются при расчете.

Значения прогноза по уравнению квадратичного тренду больше приближены к истинному значению, что говорит о более лучшей модели прогноза по сравнению с линейной функцией.

Заключение

В данной дипломной работе мы рассматривали различные динамические процессы, происходящие в море Лабрадор, прогнозировали изменение гидрометеорологических характеристик данного моря статистическими методами добиваясь сверхдолгосрочного прогноза.

Нами были рассмотрены четыре гидрометеорологические характеристики, по которым мы получили следующие временные ряды: температура поверхности океана (1854-2023 года), температура воздуха (1949-2023 года), атмосферное давление (1949-2023 года) и площадь распространения морского льда (1979-2017 года).

Нами были применены два метода прогнозирования - через программу Prisma, используя автокорреляционную функцию, спектр и регрессионно-комплектационный метод и через программу Excel, используя уравнение линейного тренда и уравнение квадратичного тренда

Результаты показали, что программа Prisma выдаёт прогнозы, максимально приближенные к фактическим значениям (ТПО, T_a , атмосферное давление).

По ПРМЛ мы рассчитывали выход на безлёдный режим, результат получился очень грубый, потому что не получилось учесть многие факторы при расчёте.

На данный момент времени нет универсальной методики для прогноза гидрометеорологических характеристик, потому что структур рядов, состоящих из множества компонентов достаточно сложная. Поэтому для каждого ряда нужна своя определённая методика, учитывающая его особенности.

Список использованной литературы

- [1] Смирнов Ч.П., Вайновский П.А. Титов Ю.Э. Статистический диагноз и прогноз океанологических процессов – СПб.: 1999
- [2] Вайновский П.А., Густоев Д.В. Статистическое прогнозирование гидрометеорологических временных рядов. – СПб.: РГГМУ, 2019, - 240 с.
- [3] Густоев, Д.В. Методическое руководство к дежурству Статистиковеероятностное прогнозирование гидрометеорологических характеристик лекционного курса дисциплины "Теория прогнозирования" / Д.В. Густоев. – Санкт-Петербург: кафедра ПОиОПВ, РГГМУ, 2019. – 73 с.
- [4] Густоев Д.В. Статистико-вероятностное прогнозирование гидрометеорологических элементов. – СПб.: РГГМУ, 2021, - 45 с
- [5] Руководящий документ наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения РД 52.88.629-2002
- [6] Гордеева С.М. Анализ временных рядов. Практикум – СПб.: РГГМУ, 2023