



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
(магистерская диссертация)

На тему «Сверхдолгосрочное прогнозирование ледовых фаз для повышения
эффективности работы порта в период зимней навигации»

Исполнитель

Мхейн Максим Александрович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

Кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Густоев Дмитрий Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

И.о. заведующего кафедрой _____

(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«11» сентября 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ОПИСАНИЕ РЕГИОНА ИССЛЕДОВАНИЯ	5
1.1. История и расположение порта «Усть-луга»	5
1.2. Особенности инфраструктуры и объемы грузооборота	6
1.3. Особенности работы порта Усть-Луга в период зимней навигации	8
1.3.1. Ледокольное сопровождение	8
1.3.2. Организация портовой деятельности и необходимые инфраструктурные меры	8
1.3.3. Преимущества круглогодичной работы	10
1.4. Выводы по главе	10
ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ	11
2.1. Лужская губа	11
2.2. Географические характеристики	11
2.3. Экологическое значение	12
2.4. Температурный режим	12
2.5. Режим осадков	14
2.6. Ледовый режим	16
2.7. Показатели толщины льда	19
2.8. Выводы по главе	20
ГЛАВА 3. Описание методов исследования	21
3.1. Статистический метод	21
3.1.1. Первичная статистика	21
3.1.2. Тренд временного ряда	22
3.1.3. Гармонический анализ	23
3.2. Комплекс программ «ASAP+»	24
3.2.1. Оценка прогностического потенциала	25
3.2.2. Стандартизация исходных данных	25
3.2.3. Функция спектральной плотности и автокорреляционная функция	26
3.2.4. Статистико-вероятностные методы экстраполяции временных рядов	28
3.3. Комплекс программ «PRISMA»	33
3.3.1. Полосовая фильтрация	34
3.3.2. Полосовой фильтр Баттерворта	35
3.3.3. Преимущества трангенсных фильтров Баттерворта	36

3.3.4. Оценка и аппроксимация амплитудной нестационарности квазипериодических составляющих	37
3.4. Выводы по главе	39
ГЛАВА 4. Статистический анализ и прогнозирование устойчивого появления льда в Лужской губе.....	40
4.1. Статистическое исследование среднегодового хода дат устойчивого появления льда в Лужской губе	40
4.1.1. Первичные статистики	41
4.1.2. Расчет и оценка значимости трендов	42
4.1.3. Гармонический анализ	44
4.2. Прогнозирование УПЛ.....	51
4.3. Выводы по главе	52
ГЛАВА 5. Статистический анализ и прогнозирование окончательного очищения ото льда	54
5.1. Статистическое исследование среднегодового хода дат окончательного очищения льда в Лужской губе	54
5.1.1. Первичные статистики	55
5.1.2. Расчет и оценка значимости трендов	56
5.1.3. Гармонический анализ	58
5.2. Прогнозирование ООЛ.....	64
5.3. Выводы по главе	65
ГЛАВА 6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ ФАЗ ДЛЯ ОБЕСПЧЕНИЯ ЗИМНЕЙ НАВИГАЦИИ ПОРТА УСТЬ-ЛУГА.....	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	71

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Сверхдолгосрочное прогнозирование ледовых фаз является крайне важной задачей для эффективного планирования работы порта в период зимней навигации. Такой прогноз позволит определить временные границы – от полного замерзания акватории до её полного очищения ото льда. Чем точнее прогноз, тем больше средств удастся сэкономить порту Усть-Луга в зимний период.

В данной работе мы попытаемся спрогнозировать даты наступления устойчивого появления льда, а также даты полного очищения акватории ото льда.

Цель исследования – анализ порта Усть-Луга и акватории Лужской губы, в которой он расположен, а также изучение ледового режима в районе порта и его прогнозирование для повышения экономической эффективности работы.

Задачи, поставленные в работе:

1. Описать акваторию и объект исследования;
2. Подготовить и обработать исходные данные;
3. Предпринять попытку прогноза временных границ;
4. Обосновать экономическое преимущество методов прогнозирования, а также его целесообразность.

Для осуществления поставленных задач было использовано ПО, а именно:

1. «Пакет анализа» MS Excel;
2. Past 4;
3. Комплекс программ «ASAP+»;
4. Комплекс программ «PRISMA».

Исходные данные:

Даты устойчивого появления льда и полного очищения акватории ото льда в период с 1949 по 2005 год, а также данные о площади покрытия льдом

Финского залива в период с 1872 по 1994 год. Эти данные были любезно предоставлены Северо-Западным УГМС в учебных целях.

ГЛАВА 1. ОПИСАНИЕ РЕГИОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. История и расположение порта «Усть-луга»

Объектом исследования является морской торговый порт Усть-Луга. Он расположен у южного берега Лужской губы, рядом с одноимённым посёлком Усть-Луга.



Рисунок 1.1 - Порт Усть-Луга

История порта Усть-Луга началась в начале 1990-х годов XX века по приказу правительства РФ о создании глубоководного порта на Балтике.

Строительство можно разделить на два этапа. Первый начался в 1993 году и полностью завершился только к 2015 году. Второй этап строительства продолжается по сей день. Он включает в себя комплексное развитие прилегающей к порту территории [1].

В ходе первого этапа в 1997 году был открыт первый угольный терминал, а с 2001 года порт начал использоваться в коммерческих целях.

Порт Усть-Луга является одним из самых важных инфраструктурных объектов России, который обеспечивает экспортные и импортные потоки страны. Расположение и технологическая оснащенность позволяют ему занимать наивысшие позиции среди портов Балтийского региона. Порт является вторым, после Новороссийского порта, по величине в России и играет ключевую роль в развитии не только транспортной системы Северо-Запада России, а также в международной торговле.

Порт — второй по величине в России после Новороссийска. Он играет ключевую роль не только в развитии транспортной системы Северо-Запада России, но и в международной торговле.

1.2. Особенности инфраструктуры и объемы грузооборота

Инфраструктура порта Усть-Луга создавалась с учетом всех современных стандартов эффективности и экологической безопасности. Порт включает 13 терминалов, 19 причалов и 17 портовых кранов. Глубина акватории порта достигает 17,5 метров, что позволяет обслуживать суда дедвейтом свыше 150 тыс. тонн. Эта особенность позволяет порту выдерживать конкуренцию в числе европейских портов Балтийского региона [2].

Автоматизированные системы управления грузопотоками позволяют за минимальное время обрабатывать суда. Кроме того, в процессе используются экологически чистые технологии для сокращения негативного влияния на окружающую среду. Близость железной дороги обеспечивает оперативную доставку грузов в любую точку страны, а также реализован удобный доступ к федеральным автомобильным трассам.

В ближайшем будущем, возвращаясь ко второму этапу строительства порта, планируется создание индустриального парка, рекреационных зон и собственного грузового аэродрома. Также значительные средства вкладываются

в развитие туристической инфраструктуры, что будет способствовать привлечению большего числа туристов и расширению внутреннего рынка услуг.

Общий грузооборот показывает стабильный рост, за исключением 2008, 2018, 2020 и 2022 годов. Самый большой рост наблюдается с 2010 по 2017 год, что связано с открытием новых терминалов. Наиболее значимым событием стало открытие в 2012 году контейнерного терминала, что значительно увеличило грузооборот порта и расширило спектр услуг для международной торговли [2].

Общий грузооборот за 2024 год составил 124,3 млн тонн, что выше по сравнению с предыдущим годом на 9,4%.

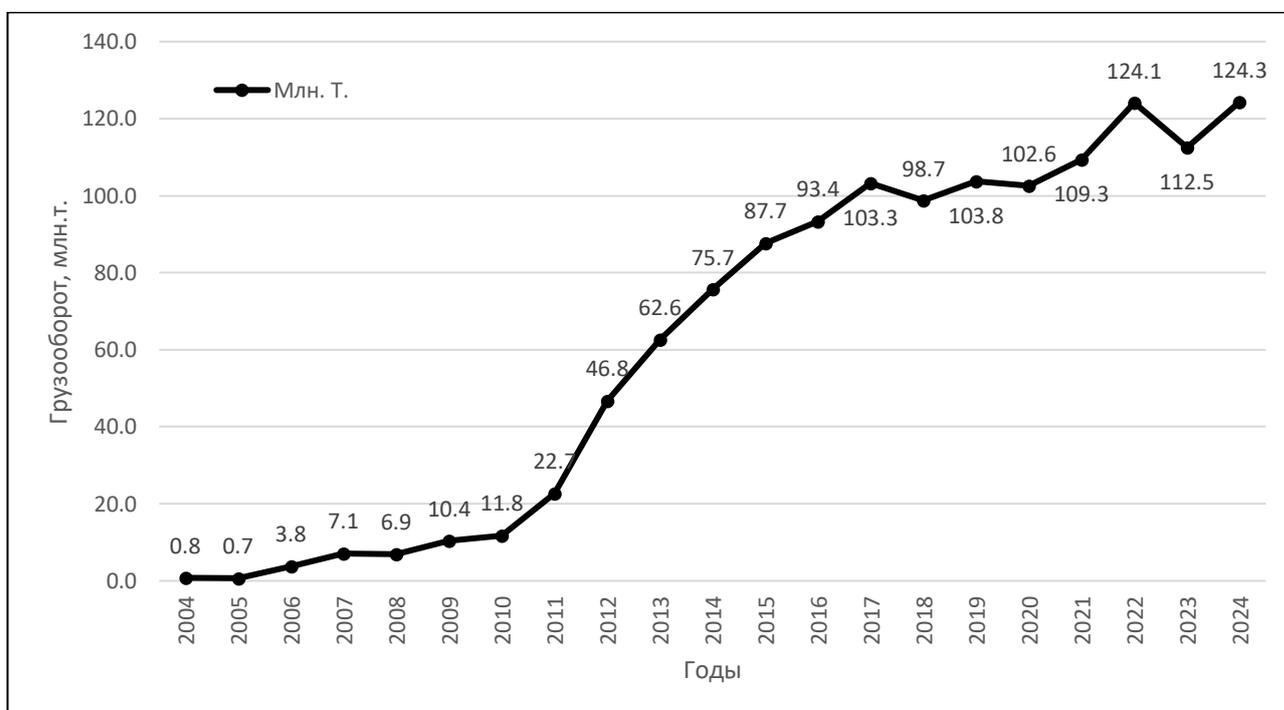


Рисунок 1.2 - Грузооборот порта Усть-луга в период с 2004 по 2024 год

За счет увеличения мощностей порта и модернизации объектов к 2030 году прогнозируется превышение грузооборота в 150 млн тонн в год. Этот грузооборот позволит порту укрепить позиции ведущего транспортного узла России.

1.3. Особенности работы порта Усть-Луга в период зимней навигации

1.3.1. Ледокольное сопровождение

Для обеспечения круглогодичной навигации порт Усть-Луга использует мощный ледокольный флот. Ледоколы обеспечивают:

1. Проведение судов через ледовые поля. Они прокладывают безопасные фарватеры для судов, направляющихся в порт или выходящих из него;
2. Очистку акватории порта. Ледоколы работают в зоне причалов, предотвращая образование ледовых заторов и торосов;
3. Маневренность судов. Ледоколы помогают судам выполнять швартовочные операции в сложных ледовых условиях.



Рисунок 1.3 - Один из причалов порта Усть-Луга в зимний период

1.3.2. Организация портовой деятельности и необходимые инфраструктурные меры

Причалы и портовые терминалы Усть-Луги спроектированы с учетом зимних условий. Усиленные конструкции выдерживают нагрузки, связанные с

давлением льда. Также предусмотрены системы отопления для предотвращения обледенения оборудования [1].

Из мер, необходимых для эффективной работы в зимний период, можно выделить следующие:

1. Мониторинг и планирование.

Порт активно использует системы мониторинга погодных условий и состояния ледового покрова. Это позволяет прогнозировать изменения и оптимизировать работу порта. Оперативная связь с судами обеспечивает координацию действий в реальном времени.

2. Обработка грузов.

Несмотря на холодные условия, порт продолжает перевалку различных типов грузов, включая уголь, нефть, нефтепродукты, минеральные удобрения и контейнеры. Специальные технологии и оборудование позволяют эффективно работать с наливными и навалочными грузами при низких температурах.



Рисунок 1.4 - Один из терминалов порта Усть-Луга в зимний период

1.3.3. Преимущества круглогодичной работы

Из преимуществ круглогодичной работы можно выделить:

1. Экономическая выгода. Круглогодичная работа порта Усть-Луга способствует стабильному грузообороту, что укрепляет позиции страны на мировом рынке логистики и торговли.

2. Повышение надежности. Возможность перевалки грузов в зимний период делает порт надежным партнером для международных перевозчиков и отечественных экспортеров.

3. Интеграция с транспортной сетью. Железнодорожные и автомобильные маршруты, связанные с портом, адаптированы к зимней эксплуатации, что обеспечивает бесперебойную логистику.

1.4. Выводы по главе

1. Порт Усть-Луга — стратегически важный и интересный объект для исследования, который постоянно модернизируется и совершенствуется, что позволяет ему сохранять лидирующие позиции в регионе.

2. Грузооборот порта увеличивается с каждым годом, что позволяет ему сохранять статус одного из ключевых портов России.

3. Работа порта Усть-Луга в зимний период является примером сочетания эффективного управления, современного технического оснащения и грамотной организации логистики. Благодаря мощному ледокольному сопровождению, устойчивой инфраструктуре и высокому профессионализму сотрудников, порт успешно справляется с вызовами сурового северного климата, обеспечивая стабильность грузопотоков и развитие экономики региона.

ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Лужская губа

Лужская губа — часть Финского залива Балтийского моря, расположенная в Ленинградской области Российской Федерации. Эта акватория имеет стратегически важное географическое положение, соединяя водные пути с основными транспортными маршрутами Северо-Запада России. Лужская губа играет важную роль не только в экономике, но и в природной экосистеме.

Помимо портовой деятельности, Лужская губа используется для рыбного промысла и туризма. Рыбный промысел в этом районе имеет как промышленное, так и любительское значение [3].

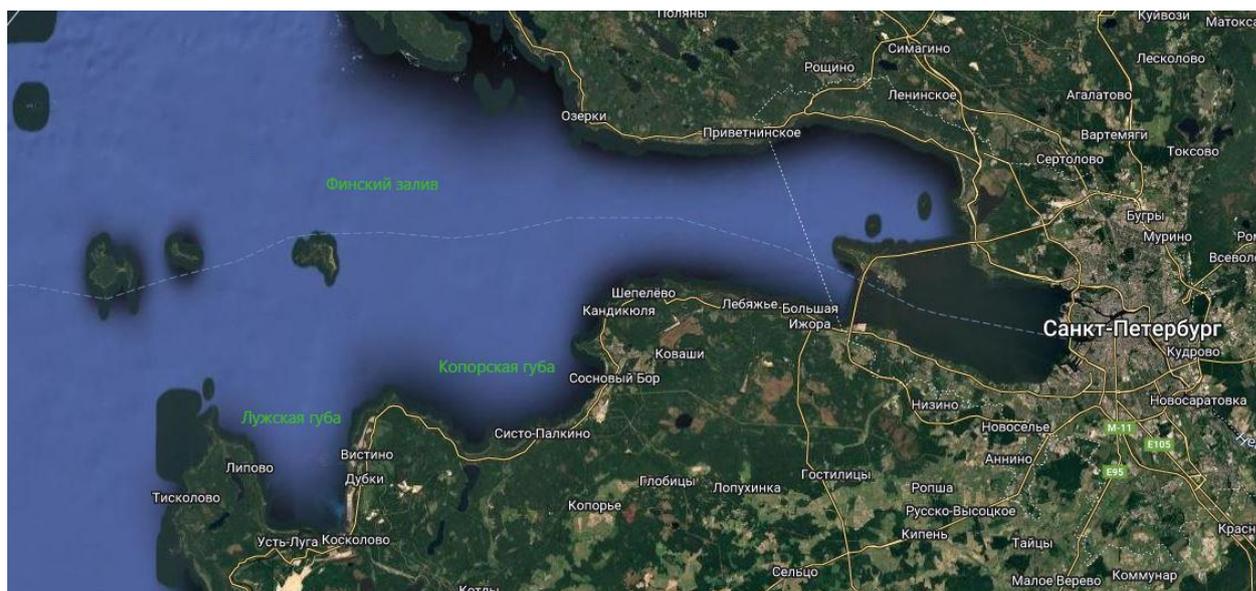


Рисунок 2.1 - Географическое расположения Лужской губы на карте

2.2. Географические характеристики

Лужская губа имеет вытянутую форму и вдается в материк на значительное расстояние. Она ограничена мысами Плоский и Круглый. Акватория относительно мелководная, с максимальными глубинами около 20 метров, что делает ее удобной для судоходства после проведения дноуглубительных работ.

Площадь Лужской губы составляет порядка 100 квадратных километров, а длина береговой линии превышает 40 километров. Губа окружена смешанными лесами и болотистыми участками, что формирует уникальный природный ландшафт [3].

2.3. Экологическое значение

Экологическое значение Лужской губы велико. Она является важным элементом экосистемы Балтийского моря. Здесь обитают многочисленные виды рыб, такие как треска, лещ и судак, а также водятся морские млекопитающие, например, тюлени. На побережье губы гнездятся редкие виды птиц, что делает эту территорию привлекательной для орнитологов и экологов.

Использование Лужской губы в промышленных целях оказывает значительное влияние на её экосистему. Постоянный рост портовой инфраструктуры и судоходства требует тщательного контроля и разработки технологий, направленных на снижение экологического воздействия на экосистему [4].

2.4. Температурный режим

Температурный режим акватории характеризуется умеренно-континентальным климатом с ярко выраженной сезонностью. Погодные условия региона оказывают сильное влияние на формирование ледового покрова.

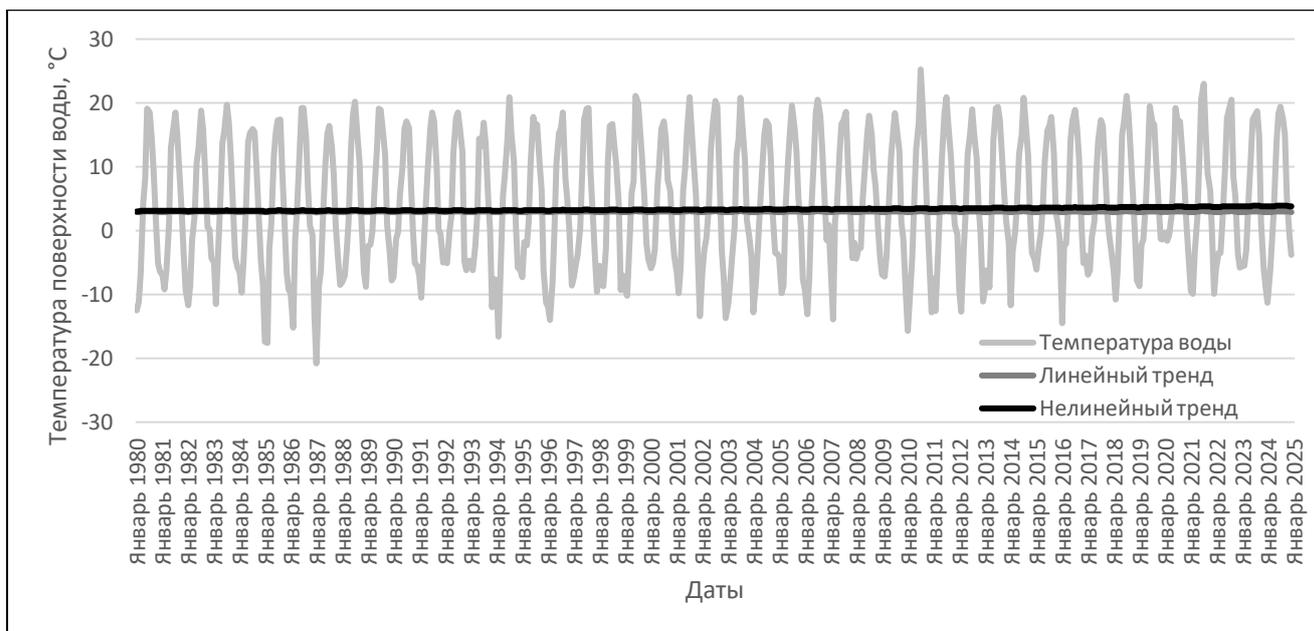


Рисунок 2.2 - Среднемесячный ход температуры поверхности воды Лужской губы в точке (59.99861 с.ш., 28.125 в.д) в период с января 1980 по декабрь 2024 года

Исходя из рисунка 2.2, можно отметить, что распределение среднемесячной температуры происходит равномерно. Наибольшая температура воды наблюдается в июле 2010 года и составляет 25,24 °С. Наименьшая температура была зафиксирована в январе 1987 года и составила -20,8 °С. Линии линейного и нелинейного графиков почти прямые, с небольшим ростом в положительную сторону. Это может свидетельствовать о том, что среднемесячная температура постепенно, но стабильно растет из года в год, без резких скачков и аномалий.

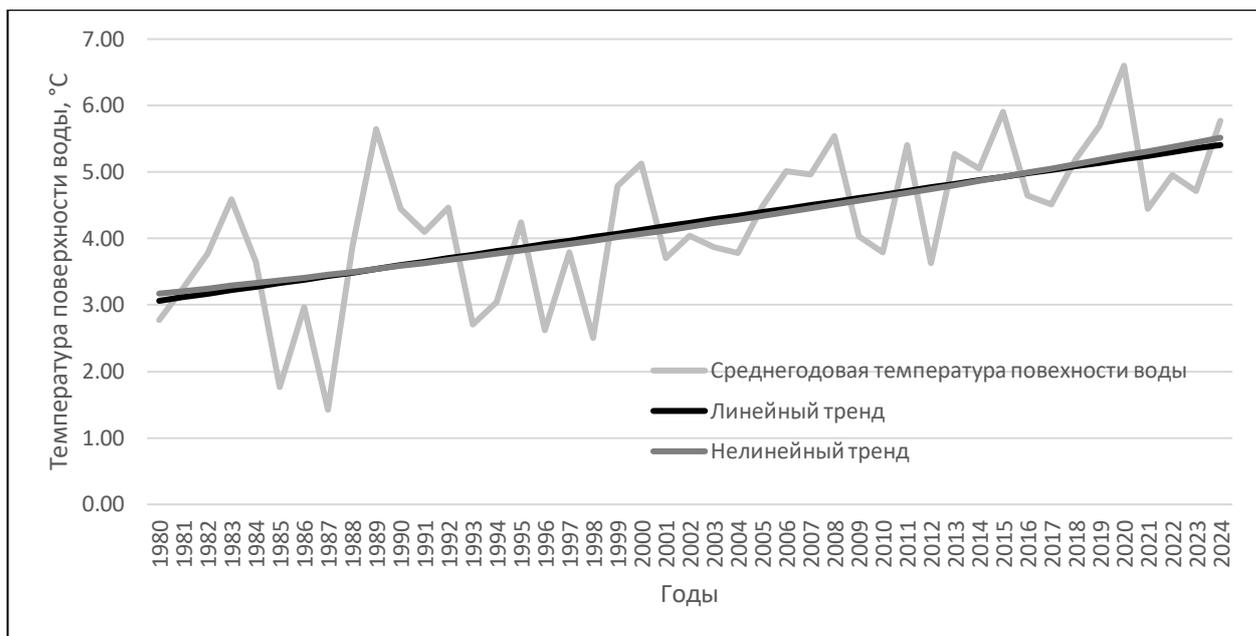


Рисунок 2.3 - Среднегодовой ход температуры поверхности воды Лужской губы в точке (59.99861 с.ш., 28.125 в.д) в период с января 1980 по декабрь 2024 года

Из рисунка 2.3 видно, что среднегодовая температура растет. Самым холодным годом был 1987, что также подтверждается графиком среднемесячной температуры поверхности воды — среднегодовая температура в этом году составила 1,43 °С. Самым теплым годом является 2024, с среднегодовой температурой 6,64 °С, что в 4,6 раза выше, чем в самом холодном году. Как и на рисунке 2.2, на график изменения температуры поверхности воды нанесены линейный и нелинейный тренды. Оба тренда показывают рост, что свидетельствует о стабильном увеличении среднегодовой температуры.

2.5. Режим осадков

Режим осадков Лужской губы оказывает значительное влияние на экосистему и хозяйственную деятельность региона. Мониторинг климатических изменений и управление последствиями осадков являются ключевыми задачами

для сохранения экологического баланса и обеспечения устойчивого развития прибрежной зоны.

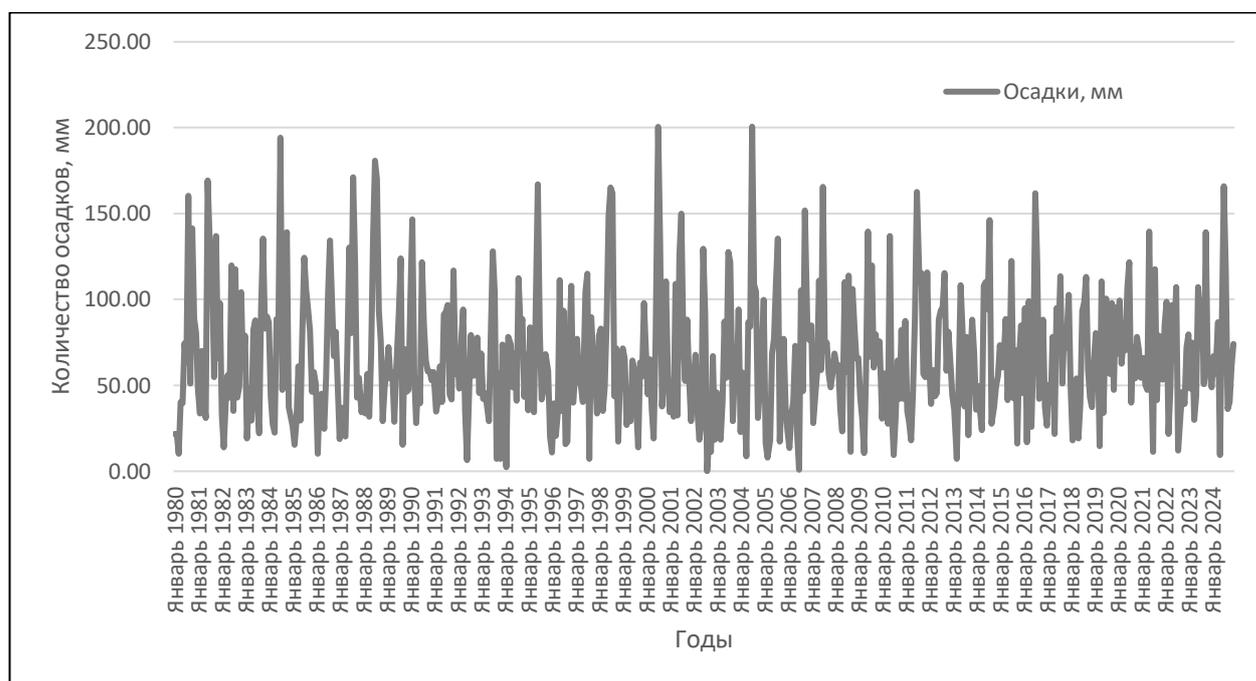


Рисунок 2.4 - Среднемесячный ход количества выпавших осадков в Лужской губе в точке (59.99861 с.ш., 28.125 в.д) в период с января 1980 по декабрь 2024 года

Из рисунка 2.4 видно, что распределение среднемесячных осадков в целом равномерное, за исключением нескольких периодов. Стоит отметить, что наибольшее количество осадков выпадает в летний период, а именно в июне и июле, в августе — меньше. Особенно много осадков выпало летом 1984, 2000 годов и в июле 2004 года. Максимальное количество осадков наблюдалось в июле 2004 года и составило 200,62 мм. Наименьшее количество осадков приходится на зимние месяцы, а меньше всего осадков выпало в августе засушливого лета 2002 года, когда осадков не наблюдалось вообще. Наименьшее количество осадков именно в летний период было зафиксировано в июле 2006 года, когда выпало всего 1,04 мм осадков.

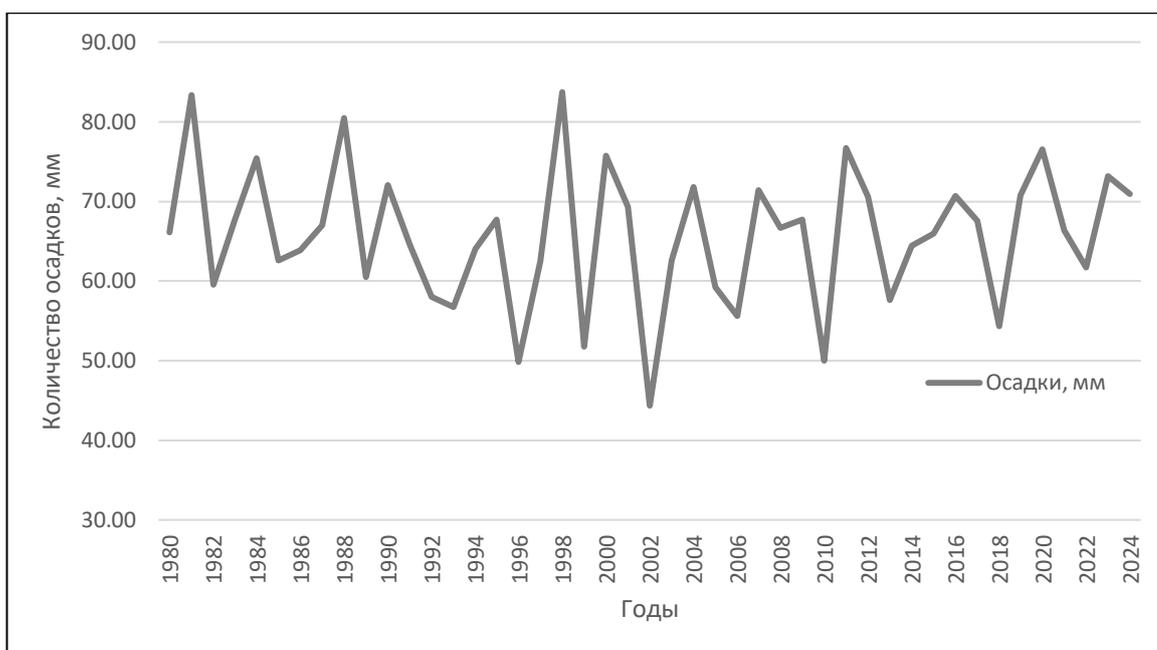


Рисунок 2.5 - Среднегодовой ход количества выпавших осадков в Лужской губе в точке (59.99861 с.ш., 28.125 в.д) в период с января 1980 по декабрь 2024 года

По рисунку 2.5 видно, что среднегодовое количество выпавших осадков в Лужской губе с каждым годом, до 1996 года, снижалось. Максимальное количество осадков пришлось на 1998, среднегодовое значение достигло 83,72 мм. После этого максимума, через 4 года это значение достигло своего исторического минимума, и составило 44,34 мм. За исключением этих 2 выбросов, можно считать, что количество осадков находится в стагнации.

2.6. Ледовый режим

Лужская губа характеризуется сезонным ледовым режимом. Влияние, оказываемое на судоходство и на эксплуатацию портовой инфраструктуры очень сильное. Ледовый режим формируются под воздействием климатических факторов региона, таких как низкие зимние температуры, ветер и гидрологические особенности Финского залива [6].



Рисунок 2.6 - Акватория Лужской Губы в зимний период

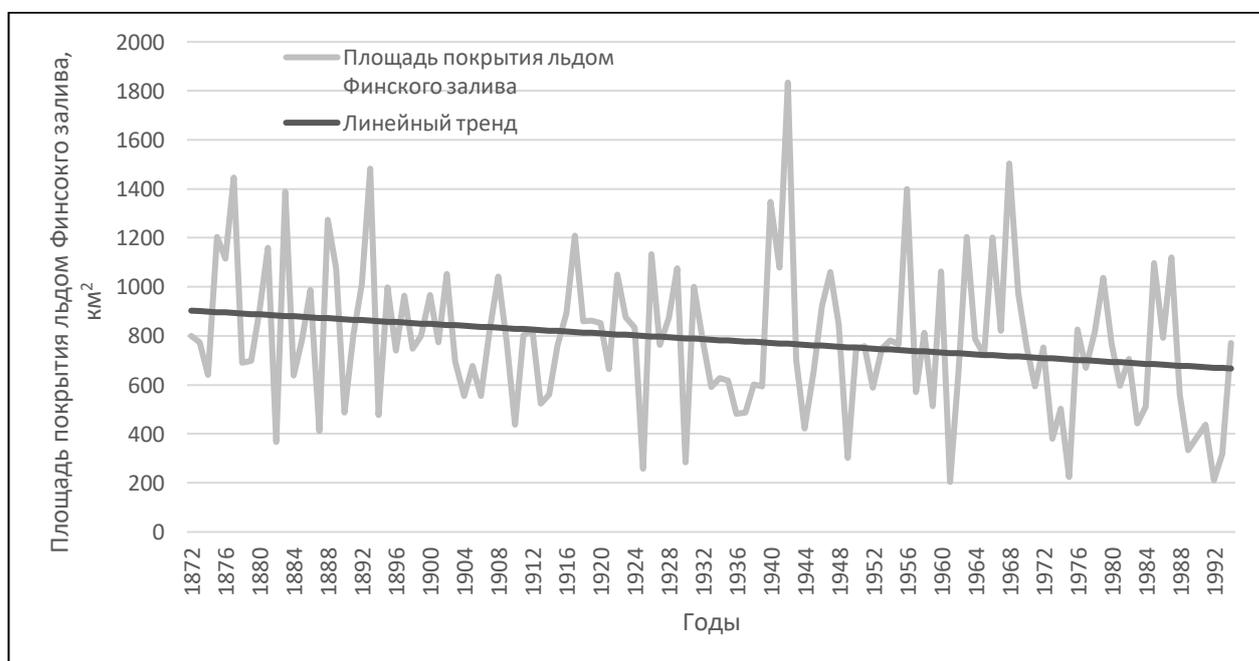


Рисунок 2.7 – График хода площади покрытия льдом Финского залива в период с 1872 по 1992 годы

Из рисунка 2.7 видно, что площадь, покрытая льдом, имеет тенденцию к уменьшению. Каждый год её значение различается. Наибольшая площадь ледового покрытия была зафиксирована в 1942 году — 1834 км², а наименьшая в 1961 году — 204 км².

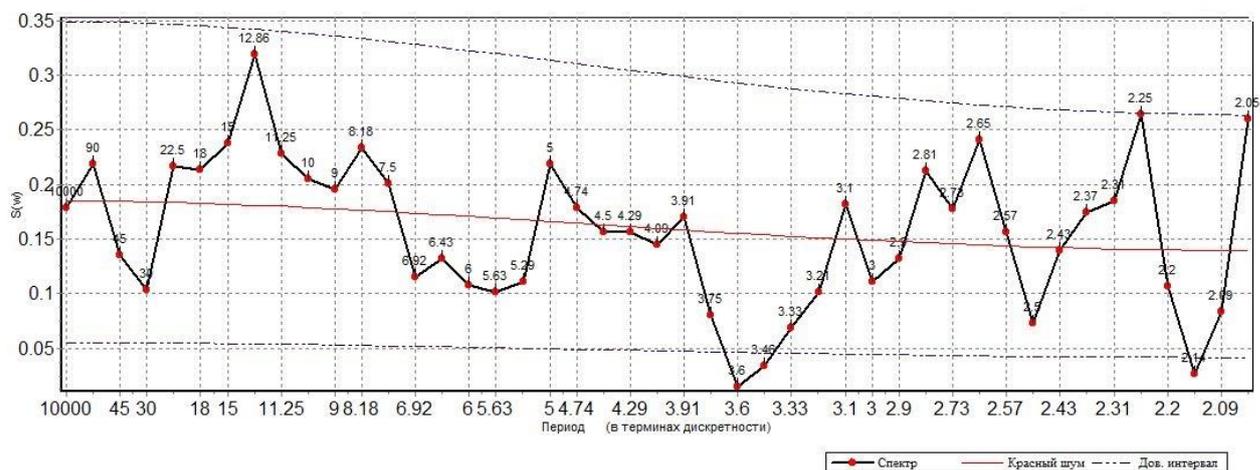


Рисунок 2.8 – Спектральное разложение ряда данных площади покрытия льдом Финского залива

Из рисунка 2.8 мы видим, что в структуре ряда ледовитости присутствует влияние 11-летней солнечной активности, 7-8-летний цикл нутаций магнитных полей Земли (магнитные поля влияют на сейсмическую активность, следовательно, имеется дальняя связь со льдом), 5-6 летний цикл взаимодействия океан-атмосфера, а также высокочастотные компоненты, связанные с локальной климатической изменчивостью.

В акватории Лужской губы ледяной покров начинает формироваться в конце ноября — начале декабря. Сначала лед образуется в прибрежной зоне из-за слабого течения и мелководья. В центральной части губы лед формируется позже из-за большей глубины и влияния течений

Лед, в основном, сплошной припайный в прибрежных зонах и дрейфующий в центральной части акватории. Под воздействием ветра и течений

дрейфующий лед может образовывать торосы, которые представляют особую опасность для судоходства.

В конце марта — начале апреля происходит постепенное разрушение ледяного покрова. Интенсивное таяние льда происходит под воздействием солнечного тепла, ветра и повышения температуры воды. К концу апреля происходит полное очищение акватории от льда.

Ледовый режим оказывает значительное влияние на работу порта Усть-Луга. Для обеспечения круглогодичной навигации в зимний период применяются следующие меры:

1. Ледокольное обеспечение. Для сопровождения судов и обеспечения безопасного прохода через ледяные поля в Лужской губе используются ледоколы. Они прокладывают фарватеры и помогают судам добраться до причалов порта. Флот ледоколов состоит из современных судов, оснащенных мощным оборудованием для работы в сложных ледовых условиях.

2. Адаптированные технологии. В порту используются усиленные конструкции причалов, рассчитанные на нагрузку от льда. Кроме того, внедрены системы мониторинга ледовых условий, позволяющие оперативно отслеживать изменения ледового покрова.

Ледовый режим Лужской губы также играет важную роль в экологии региона. Зимой ледовый покров снижает уровень штормовой активности и защищает прибрежные экосистемы от эрозии. Однако активное использование акватории в зимний период требует дополнительных мер для минимизации воздействия на природу.

2.7. Показатели толщины льда

Толщина ледяного покрова в период с 2000 по 2010 годы в среднем составляла 30-50см в зимний период (январь-март), максимальные значения

достигались в самые суровые зимы, например, в 2004 году ледяной покров составлял 70-80 см.

В период с 2010 по 2020 годы, глобальное потепление стало оказывать сильное влияние на ледовый режим Финского залива, включая Лужскую губу, средняя толщина льда сократилась до 20-40 см в зимний период [7]. В аномально теплую зиму 2019-2020 годов ледяной покров почти не формировался, аномально теплую зиму также можно наблюдать на графике хода среднегодовой температуры поверхности воды (рисунок 2.3).

В период с 2010 по наши дни наблюдается дальнейшее потепление, из-за чего толщина ледяного покрова редко превышает 15-30 см. В 2023 году ледяной покров сформировался только в прибрежной зоне, а акватория осталась незамерзшей.

2.8. Выводы по главе

Лужская губа — уникальный природный и экономический объект, сочетающий в себе богатую экосистему и стратегическое значение для транспортной системы России. Ее дальнейшее развитие требует баланса между хозяйственной деятельностью и охраной окружающей среды, что позволит сохранить природное наследие региона и повысить его значение в экономике страны.

Ледовый режим Лужской губы — это ключевой фактор, влияющий на навигацию, портовую деятельность и экологическую ситуацию в регионе. Благодаря современным технологиям и эффективной организации ледокольного обеспечения, порт Усть-Луга успешно работает в условиях суровой зимы, обеспечивая стабильность грузоперевозок и экономическую устойчивость региона.

ГЛАВА 3. Описание методов исследования

3.1. Статистический метод

Данный метод исследования является способом изучения явлений и процессов путем сбора, обработки, анализа и интерпретации числовых данных. Этот метод основан на выявлении закономерностей, тенденций и зависимостей между различными показателями, что позволяет делать обоснованные выводы и прогнозы.

Главное преимущество статистического метода – объективность, поскольку он опирается на числовые данные, что снижает влияние субъективных факторов и повышает точность исследования.

3.1.1. Первичная статистика

Первичный статистический анализ позволяет описать исследуемый процесс. Для прогнозирования и оценки исходных рядов данных нужно учитывать следующие характеристики:

1. Среднее арифметическое значение.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.1)$$

* N – длина выборки.

2. Дисперсия и связанное с ней стандартное отклонение. Описывают средний разброс значений ряда от среднего арифметического значения.

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \sigma = \sqrt{D}. \quad (3.2)$$

* D – дисперсия; σ – стандартное отклонение.

3. Размах вариации. Характеризует максимальный разброс значений ряда.

$$R = \max - \min \quad (3.3)$$

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

$$C = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100 \quad (3.4)$$

3.1.2. Тренд временного ряда

Тренд отражает наличие во временной изменчивости исследуемой характеристики длиннопериодного колебания с периодом, существенно превышающим длину выборки.

Тренд бывает линейный и нелинейным, в зависимости от того, на какую часть длиннопериодного колебания попала выборка.

Уравнение линейного тренда:

$$y = a_1 t + a_0 + \varepsilon \quad (3.5)$$

Уравнение нелинейного тренда:

$$y = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 + \varepsilon \quad (3.6)$$

* t – время.

Основные характеристики тренда.

1. Коэффициент детерминации r^2 (для линейного тренда) или его нелинейный аналог – корреляционное отношение η^2 , характеризующий вклад тренда в общую дисперсию ряда. Вклад может быть значимым или незначимым,

это проверяется путем проверки коэффициента корреляции r (далее – КК) или η на значимость. В случае незначимости – тренда нет [8].

2. Величина тренда – изменение характеристики по линейному тренду за определенный промежуток времени. Величина тренда равна коэффициенту a_1 линейного тренда и имеет размерность характеристики y за единицу дискретности [8].

3.1.3. Гармонический анализ

Гармонический анализ заключается в разложении любого ряда в ряд Фурье без остатка, то есть на конечное число гармоник.

Гармоника – тригонометрическая функция, имеющая период, кратный длине ряда, то есть каждая гармоника целое число раз «укладывается» в длину исходного ряда [8].

Формула гармоника:

$$G_k = A_k \cos(\omega_k t - \phi_k), \quad \omega_k = 2\pi/T_k \quad (3.7)$$

* k – номер гармоника; A_k – амплитуда k -той гармоника; ω_k – частота k -той гармоника; T_k – период k -той гармоника; ϕ_k – фаза k -той гармоника; t – время.

Характеристики гармоника определяются на основании коэффициентов Фурье:

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \sin(\omega_k * t_i)] \quad (3.8)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \cos(\omega_k * t_i)] \quad (3.9)$$

* x_i – исходный ряд; N – длина ряда; ω_k – частота k -той гармоника; t_i – ряд времени.

Характеристики гармоники определяются по формулам:

1. Амплитуда гармоники.

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (3.10)$$

2. Фаза гармоники.

$$\phi_k = \operatorname{arctg} \frac{a_k}{b_k} \pm \pi \quad (3.11)$$

3. Дисперсия гармоники.

$$D_k = \frac{A_k^2}{2} \quad (3.12)$$

4. Вклад гармоники в общую дисперсию ряда.

$$V_k = \frac{D_k}{D_y} \quad (3.13)$$

3.2. Комплекс программ «ASAP+»

Комплекс предназначен для экстраполяции временных рядов с использованием статистико-вероятностных методов. Он разработан на основе концепции и методологической базы пакета «ASAP+» и представляет собой дальнейшее развитие данного подхода.

Модули комплекса стандартизированы по входным параметрам, а ввод расчетных данных полностью автоматизирован. Алгоритм расчета (рисунок 3.1) включает пять этапов, начиная с обработки исходной информации и заканчивая формированием прогностических рекомендаций.

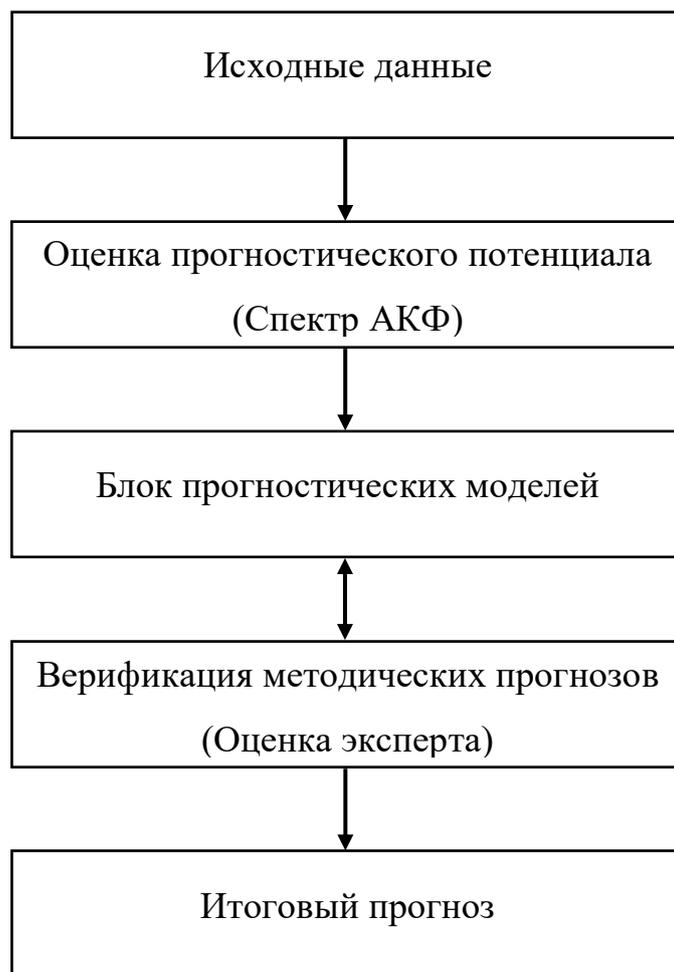


Рисунок 3.1 - Блок-схема алгоритма расчета пакета «ASAP+»

3.2.1. Оценка прогностического потенциала

Расчет базовых статистических параметров необходим для получения общей картины исследуемого процесса. В рамках данной работы были использованы следующие статистические показатели [9, 10, 11]: среднее значение, дисперсия, амплитуда колебаний, коэффициенты асимметрии и эксцесса.

3.2.2. Стандартизация исходных данных

Для того, чтобы произвести хороший, детальный анализ данных необходимо привести их к единому стандарту. Это позволит избавиться от долгосрочных трендов, и более детально рассмотреть краткосрочные изменения. Для этого используется приведение ряда данных к виду «доли от сигма», что дает

возможность провести более углубленный анализ изменчивости. Также подобная стандартизация позволяет привести данные к безразмерному виду, или к единой размерности, что в свою очередь, позволяет свободно арифметически оперировать исходными данными и их отдельными составляющими внутренней структуры. Стандартизация определяется по соотношению:

$$Y_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma_x} \quad (3.13)$$

* Y_i – стандартизированное значение, σ_x - среднее квадратическое отклонение.

3.2.3. Функция спектральной плотности и автокорреляционная функция

Спектр плотности позволяет выявлять скрытые периодичности в структуре исходного ряда, анализировать их частоту, а также применять эти данные для прогнозирования квазистационарных процессов.

Большую часть процессов в океане можно описать как комбинацию детерминированной и стохастической составляющих ряда ($X_{\text{дет}} + X_{\text{стох}}$).

Основными параметрами таких циклических функций являются [10]:

Период (τ); циклическая ($\omega = 2\pi/\tau$) и линейная ($f = 1/\tau$) частоты; амплитуда (A); фазовый угол (φ).

Для анализа циклических компонентов исходный временной ряд преобразуется из временной шкалы в частотную шкалу, где оцениваются периоды и амплитуды. Такое преобразование позволяет получить функцию, отображающую распределение дисперсий исходного ряда по частотам, которая называется функцией спектральной плотности.

Оценка спектральной плотности производится с использованием автокорреляционной функции (далее - АКФ) через обратное преобразование Фурье или на основе методов регрессионной оценки [10, 11].

$$S(f) = \frac{2}{m} R_0 + 2 \sum_{i=0}^m R_i * \cos(2\pi f_i/f_h) + R_m * \cos(2\pi f_i/f_h) \quad (3.14)$$

* ($f = 1/\tau$) – линейная частота; ($F_h = 1/2\Delta t$) – частота

Найквиста; R_0, R_i, R_m – оценки АКФ.

Оценка АКФ проводилась по формуле:

$$R_i = \frac{1}{\sigma_x^2(N-M) \sum_{j=1}^{N-M} (X_j - \bar{X}) * (X_{j+1} - \bar{X})}; \quad i = 0, \dots, M \quad (3.15)$$

В целях уменьшения влияния ограниченности длины исходного ряда и максимального сдвига АКФ на результирующую оценку спектральной плотности используют функцию «спектральное окно». Данная функция способствует удалению из АКФ мелких колебаний.

Вид спектрального окна может задаваться различными способами:

$$\text{окно Хемминга: } H_i = \begin{cases} 0,54 + 0,46 \cos(\pi i/\tau_0) & i \leq \tau_0, \\ 0 & i > \tau_0, \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\text{окно Парзена: } H_i = \begin{cases} 1 - 6\tau^2/\tau_0(1 - i/\tau_0)^2 & i \leq \tau_0, \\ 0 & i > \tau_0, \end{cases} \quad (3.17)$$

Отличительной чертой большинства спектральных окон и частотно-весовых функций является их способность сглаживать оценки АКФ (окно Хемминга может вызывать появление отрицательных значений в спектре), что приводит к искажению оценок спектральной плотности [10, 11]. Тем не менее, это считается допустимым, ибо истинные спектральные оценки, как правило, неизвестны, а определение возможных погрешностей затруднено. Для проверки достоверности (значимости) полученных данных рассчитываются доверительные интервалы спектральной функции и спектр красного шума [9, 10].

Верхняя и нижняя границы доверительных интервалов определяются с использованием следующих соотношений:

$$S_0(f) - \frac{x^2}{v} < S(f) < S_0(f) + \frac{x^2}{v} \quad (3.18)$$

$$* S_0(f) = \sum_{f=0,01}^{2\pi} S_0(f)/N; \quad v = \frac{2N-m/2}{m}.$$

Спектр красного шума рассчитывается по формуле:

$$S(f)_{\text{к.ш.}} = \frac{1-R_1^2}{1+R_1^2-2R_1 \cos(2\pi f)} \quad (3.19)$$

Таким образом, физический смысл функции спектральной плотности заключается в том, что она характеризует распределение дисперсии случайной квазистационарной функции по частотам. Для прогнозиста наличие чёткого, выраженного и устойчивого пика указывает на возможность применения метода Фурье для её аппроксимации и экстраполяции.

Оценка закономерностей во внутренней структуре временных рядов очень важна. Именно они определяют «прогностический потенциал» для эффективного применения статистико-вероятностных моделей. Если закономерностей нет, то и «прогностический потенциал» минимален, что вынуждает либо отказаться от прогнозирования данным методом, либо предлагает пользователю самостоятельно экстраполировать квазилинейную тенденцию на следующий временной интервал.

3.2.4. Статистико-вероятностные методы экстраполяции временных рядов

Экстраполяция гидрометеорологических и биолого-промысловых характеристик - сложная задача. Во-первых, из-за высокой сложности самих процессов, происходящих в океане и атмосфере. Во-вторых, недостаток научно обоснованных знаний затрудняет адекватное описание этих процессов. Помимо этого, взаимодействие базовой теории с результатами математического

моделирования реальных данных, в аналитических и прогностических целях, остаётся крайне сложной задачей.

Недавние исследования показали, что природные процессы характеризуются неоднородностью и нестационарности, что делает невозможным их рассмотрение как строго структурированной и поддающейся точному описанию системы [9, 12]. Это создаёт предпосылки для развития прикладных методов статистического анализа. Разнообразие факторов, влияющих на временную изменчивость различных характеристик, затрудняет однозначную систематизацию причинно-следственных связей. В результате статистико-вероятностные методы анализа и прогноза приобретают всё большее значение, особенно на начальных этапах исследования [9, 12].

Основным преимуществом статистико-вероятностного подхода к прогнозированию является возможность стандартизации этого процесса.

Любая прогностическая схема представляет собой модель развития изучаемого процесса. При этом не всегда важно, основана ли она на глубоких физических закономерностях или представляет собой формальную математическую конструкцию. Ключевым критерием качества модели является её способность адекватно описывать фактические данные. В этой связи использование моделей, учитывающих закономерности во внутренней структуре исследуемого процесса, базируется на следующих предпосылках:

1. Модели используют единственный входной сигнал - сам исследуемый процесс;
2. Алгоритмы расчетов хорошо поддаются автоматизации;
3. Расчеты не требуют мощных вычислительных ресурсов и сложной аппаратуры;
4. Результаты расчетов достаточно просты в интерпретации и наглядны.

Таким образом, основная задача заключается в интеграции наиболее известных прогностических моделей, основанных на статистико-вероятностных

методах, в единый программный комплекс. В процессе прогнозирования приходится учитывать влияние параметров и явлений, которые теория обычно игнорирует, что требует постоянного возврата от прогноза к диагностике и анализу исходных данных. В результате теория может одновременно точно описывать явления, удовлетворительно их объяснять, но при этом слабо предсказывать их развитие [12]. Совершенствование моделей тесно связано с уточнением теорий, и наоборот. Следовательно, для успешной реализации такого подхода необходимо учитывать ключевые методологические принципы построения моделей:

1. Принцип системности;
2. Согласованность модели со структурой исходных данных;
3. Полнота, адаптивность и эволюционность модели;
4. Простота модели.

Исходя из этого, логическая разработка прогностической модели основывается на принципе научных исследований, объединяющем три ключевых этапа: описание (анализ), объяснение (диагноз) и предсказание (прогноз). Именно с этой точки зрения следует подходить к задаче экстраполяции различных характеристик.

При моделировании внутренней структуры временных рядов использовались методы, которые способны адаптироваться структуре исследуемого процесса. В настоящее время существует множество таких моделей, однако действительно различающихся по типу воспроизводимых процессов не так много. К их числу можно отнести следующие методы:

1. Климатический;
2. Инерционный;
3. Байесовский;
4. Динамико-статистический;

5. Динамико-стохастический;
6. Авторегрессионные 1-го, 2-го и 3-го порядков;
7. Фурье.

Способы оптимизации прогностической информации при неудовлетворительных результатах работы основных моделей:

1. Средняя комплексация прогнозов;
2. Регрессионная комплексация прогнозов.

Все перечисленные методы (Табл. 3.1) отличаются простотой реализации, возможностью настройки и самообучения. Благодаря модульной структуре данный блок может быть дополнен новыми моделями или усовершенствован за счёт модернизации уже существующих [9, 12].

Качество итогового прогноз определяется после оценки качества работы каждой статистико-вероятностной модели. Для этого в исходной выборке выделяется так называемый "методический" участок, на котором анализируется устойчивость методов, точность прогнозов, а также зоны максимальных и минимальных ошибок. На основе полученных оценок формируется итоговое прогнозное значение.

Для проверки надёжности методов и выбора наиболее эффективного используются следующие критерии:

Таблица 3.1 - Соотношения, используемые в статистико-вероятностных методах экстраполяции и оптимизации прогнозов

Название метода	Математическое выражение
Климатический	$X_i = \bar{X}$
Инерционный	$X_i = X_{i-1}$
Байесовский	$X_i = P_{max} \times X_{i-1}$
Динамико-статистический	$X_i = \sum_{n=1}^k A_n \times X_{i-1}$
Динамико-стохастический	$X_i = A_1(I) \times X_{i-1}$

Авторегрессия 1-го порядка	$X_i = A_{11} \times X_{i-1}$
Авторегрессия 2-го порядка	$X_i = A_{21} \times X_{i-1} + A_{22} \times X_{i-2}$
Авторегрессия 3-го порядка	$X_i = A_{31} \times X_{i-1} + A_{32} \times X_{i-2} + A_{33} \times X_{i-3}$
Фурье	$X_i = \sum_{j=1}^n (A_j \times \cos(j\omega t) + B_j \times \sin(j\omega t))$
Средняя комплексация	$X_i = 1/m \sum_{j=1}^m X_j$
Регрессионная комплексация	$X_i = 1/m \sum_{j=1}^m B_j \times X_j$

Средняя и максимальная ошибка метода; дисперсия ошибки методических прогнозов; оценка оправдываемости моделей по знаку; оценка оправдываемости по критериям 0.67σ и 0.8σ оценка надежности модели; оценка предельной заблаговременности прогноза.

Соотношения, используемые при верификации методических прогнозов, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Соотношения, используемые при верификации методических прогнозов

Название соотношения	Математическое выражение
Средняя ошибка прогноза	$Y = 1/N \sum_{i=1}^N Y_i$
Дисперсия ошибки прогноза	$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$
Оправдываемость прогнозов по знаку	$P = n_+ / n_+ + n_- \times 100$
Оправдываемость по критерию $0,67\sigma$	$P = n_{0.67\sigma} / N \times 100$
Оправдываемость по критерию $0,8\sigma$	$P = n_{0.8\sigma} / N \times 100$
Оценка надежности модели	$P = \sigma_y / \sigma_x$
Оценка предельной заблаговременности	$L = \ln [1 - \sigma_y(1)] / 2 \ln r$

3.3. Комплекс программ «PRISMA»

Комплекс программ «PRISMA» является автоматизированной системой статистико-вероятностного прогнозирования с одновременным анализом особенностей частотной структуры временного ряда. Предназначена для выполнения первичного статистического анализа временных рядов, выделения отдельных частотных компонентов из их структуры, «методической» аппроксимации и последующей экстраполяции временного ряда на один временной шаг.

Данный комплекс программ является модификацией комплекса «ASAP+». В данный комплекс, при расчете итогового прогноза, добавляется полосовая фильтрация. Алгоритм работы комплекса изображен на рисунке 3.2.

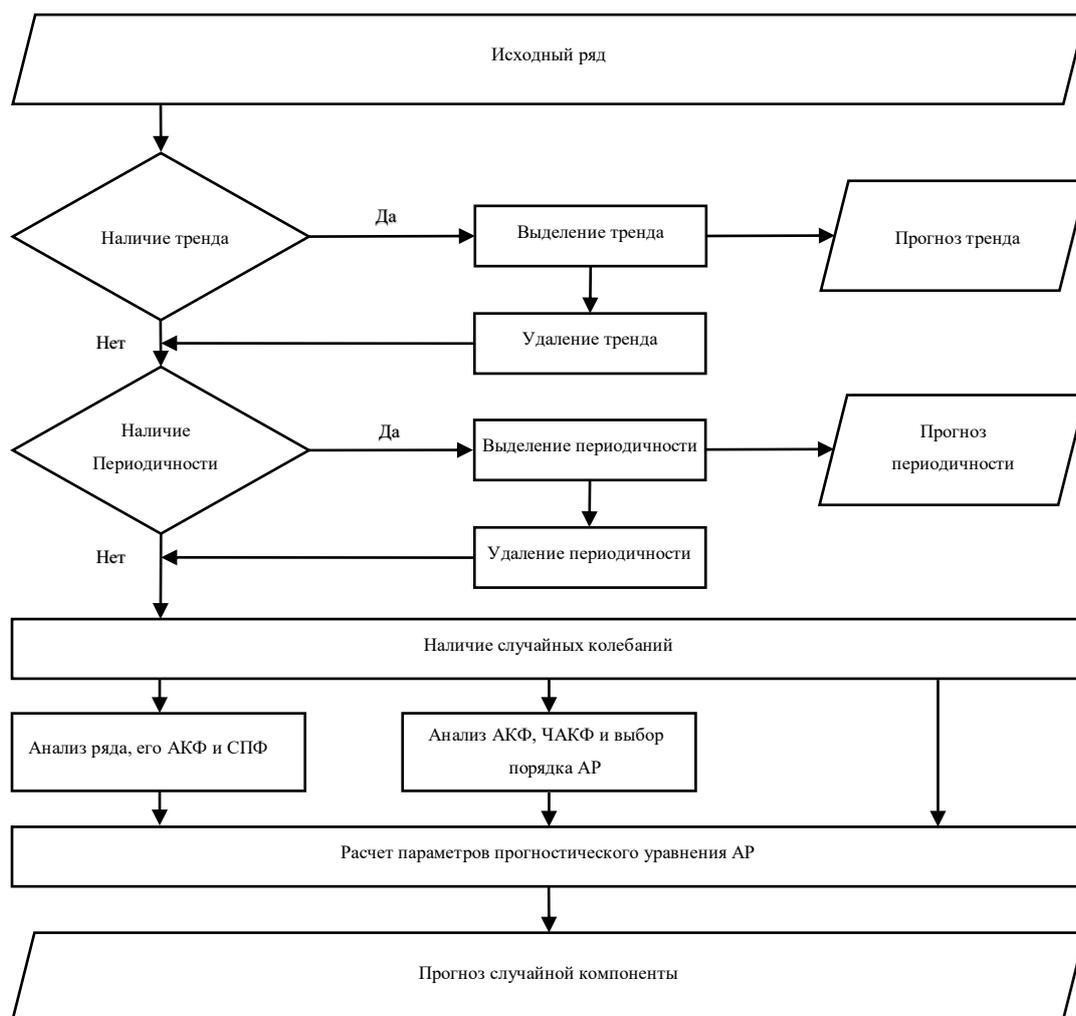


Рисунок 3.2 - Блок-схема расчета пакета «PRISMA»

Начальный процесс расчета совпадает с начальным расчетом комплекса программ «ASAP+». Он описан в подразделах 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4.

3.3.1. Полосовая фильтрация

Полосовая фильтрация играет важную роль в детальном исследовании внутренней структуры временных рядов. Изначально, данный метод разрабатывался для технических задач, например, для выделения из исходного процесса полезного сигнала в радиоэлектронике при известном диапазоне частот, стала широко применяться благодаря развитию вычислительных технологий. В наше время алгоритмы позволяют извлекать полезные сигналы из временных рядов, тем самым расширяя возможности анализа и обработки данных.

В океанологии метод полосовой фильтрации используется для выделения трендов, отделения синоптической изменчивости от внутригодовых процессов, а также для идентификации суточных циклов и других составляющих. Применение полосовых фильтров позволяет разложить сложную структуру исходного ряда на набор более простых компонентов, что впоследствии может быть эффективно использовано для аналитических исследований и построения прогнозов.

Наиболее распространенными типами фильтрации являются:

1. Низкочастотная;
2. Высокочастотная;
3. Режекторная;
4. Полосовая.

Низкочастотная фильтрация позволяет подавить высокочастотные компоненты исследуемого процесса, выделяя при этом низкочастотные составляющие, такие как тренд. Высокочастотная фильтрация, напротив, устраняет низкочастотные элементы, например, исключает годовой цикл из данных ежесуточных наблюдений. Режекторная (заграждающая) фильтрация

подавляет выбранную полосу частот. Полосовая фильтрация обеспечивает выделение заданного диапазона частот, представляющего интерес для исследования, причем выделяется он в «квазипериодических» терминах, позволяя отфильтровать из исходного ряда не только фиксированный частотный пик, но и его колебания в пределах заданного диапазона.

Применение полосовой фильтрации позволяет представить исходный временной ряд со сложной внутренней структурой в виде набора более простых компонент, при этом сохранив ключевую информацию об исследуемом процессе.

3.3.2. Полосовой фильтр Баттерворта

Наиболее эффективный инструмент фильтрации является полосовой цифровой фильтр Баттерворта [13, 14]. Цифровые фильтры, в том числе и фильтр Баттерворта, могут быть представлены с помощью линейного дифференциального уравнения в частотно-разностной рекуррентной форме, которое связывает отфильтрованный ряд $\{Y_i\}_{i=1}^N$ с неотфильтрованным $\{X_i\}_{i=1}^N$ следующим соотношением:

$$Y_i = \sum_{k=0}^K b_k X_{j-k} - \sum_{l=1}^L a_l Y_{j-l} \quad (3.20)$$

* b_k, a_l – действительные числа, коэффициенты фильтра

Применяя к уравнению (3.31) дискретное преобразование Фурье, получим другое выражение для фильтра:

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{\sum_{k=0}^K \beta_k Z^{-k}}{\sum_{l=1}^L a_l Z^{-l}} \quad (3.21)$$

* $Z = \exp(i\omega\Delta)$ - интервал дискретизации рядов $\{X_i\}$ и $\{Y_i\}$; $X(\omega)$ и $Y(\omega)$ – их Фурье изображения.

Функция $H(\omega)$ называется передаточной функцией фильтра и является его полной характеристикой. Она выражает связь между частотными

представлениями рядов $\{X_i\}$ и $\{Y_i\}$, и имеет значения в комплексной области, то есть $H(\omega)$ можно представить в виде:

$$H(\omega) = |H(\omega)| \exp(-i\varphi(\omega)) \quad (3.22)$$

В данном представлении функцию $|H(\omega)|$ называют амплитудно-частотной характеристикой фильтра, которая выражает отношение амплитуд гармоник отфильтрованного и неотфильтрованного рядов на заданной частоте в каждой точке частотного диапазона. Фазочастотная характеристика фильтра отражает зависимость сдвига фаз от частоты между отфильтрованным и исходным рядами.

Единое соотношение частотно-разностного уравнения соответствующее каждой $H_m(\omega)$:

$$Y_j = b_0 \omega_j^{(M_1^{-1})} + b_1 \omega_{j-1}^{(M_1^{-1})} + b_2 \omega_{j-2}^{(M_1^{-1})} - a_1 M_1 Y_{j-1} - a_2 M_1 Y_{j-2} \quad (3.23)$$

3.3.3. Преимущества тангенсных фильтров Баттерворта

Цифровой фильтр Баттерворта существует в двух вариантах: синусный и тангенсный. Тангенсная реализация обладает рядом преимуществ, включая:

1. Максимальную для заданного порядка сглаженность амплитудно-частотной характеристики;
2. Близость амплитудно-частотной характеристики к идеальной;
3. Простоту вычисления коэффициентов;
4. Высокую крутизну амплитудно-частотной характеристики вблизи частоты среза;
5. Рекуррентный метод вычисления отфильтрованного ряда;
6. Возможность повышения порядка фильтра путем увеличения числа уравнений в (3.23).

3.3.4. Оценка и аппроксимация амплитудной нестационарности квазипериодических составляющих

Нестационарность исходных временных рядов и отдельных квазипериодических компонентов их внутренней структуры проявляется, прежде всего, в изменчивости амплитуды в конкретные моменты времени. Исследование, аппроксимация и экстраполяция амплитудной нестационарности представляет интерес для эксперта по следующим причинам:

1. Определение временных интервалов, в которые конкретная составляющая исходного процесса вносит максимальный вклад в общую изменчивость временного ряда;
2. Формализация и математическое описание амплитудной нестационарности;
3. Прогнозирование амплитудной нестационарности на несколько шагов вперед с целью последующей коррекции долгосрочного прогноза исследуемого параметра.

В данном случае применяется наиболее простой метод аппроксимации амплитудной нестационарности — построение огибающих биений. Сначала исследуются положительная и отрицательная огибающие, а для обобщения общей картины используются огибающие исходного временного ряда. Алгоритм аппроксимации включает следующие шаги:

1. Построение огибающих для положительных и отрицательных значений амплитудной изменчивости отдельных квазипериодических составляющих и исходного временного ряда. Так как огибающие строятся по максимумам и минимумам, их дискретность не совпадает с дискретностью исходной выборки;
2. Приведение построенных огибающих к дискретности исходного временного ряда с помощью бикубического сплайна;

3. Экстраполяция полученных огибающих с использованием модели Фурье.

Интерполяция сплайнами строится путем подбора алгебраических полиномов степени не выше r для каждого участка сеточной области $(-\infty, X_1); (X_1, X_2), \dots (X_T, +\infty)$.

Задача сводится к решению системы линейных уравнений:

$$Y(x) = \sum_{i=0}^r A_i \times X + \sum_{j=1}^n B_j (X - X_j)^r \quad (3.24)$$

* Для кубических сплайнов $r = 3$.

Погрешность интерполяции кубическими сплайнами определяется по формуле:

$$Rn(x) \ll c \times h^4 \times |f^{(iy)}(X_i)| \quad (3.25)$$

* h -расстояние между узлами; c – константа, зависящая от степени полинома.

Экстраполяция построенных огибающих производится методом Фурье и определяется соотношением:

$$X_i = \sum_{j=1}^n (A_j \times \cos(j\omega t) + B_j \times \sin(j\omega t)) \quad (3.26)$$

Данное соотношение также используется в блоке статистико-вероятностных моделей (3.2.4).

3.4. Выводы по главе

1. Используя статистические методы можно дать оценку процессам, происходящим не только в гидрометеорологии, но и в других сферах жизни. Эти методы дают возможность четко и подробно узнать об изменениях конкретной характеристики, выявить цикличность этих изменений, а также сделать прогноз той или иной характеристики. Стоит отметить, что природные процессы достаточно проблематично спрогнозировать статистическими методами, так как влияние внешних факторов, влияющих на вылов, большое множество, и точно учесть их не получится.

2. Применяя комплекс программ «ASAP+» и «PRISMA» у нас есть возможность сделать более точный прогноз, чем статистическими методами, так как эти комплексы учитывают множество факторов, влияющие на исходный ряд.

ГЛАВА 4. Статистический анализ и прогнозирование устойчивого появления льда в Лужской губе

4.1. Статистическое исследование среднегодового хода дат устойчивого появления льда в Лужской губе

На рисунке 4.1 изображен среднегодовой ход дат полного замерзания Лужской губы, для удобства эти даты приведены в днях от 30.11.

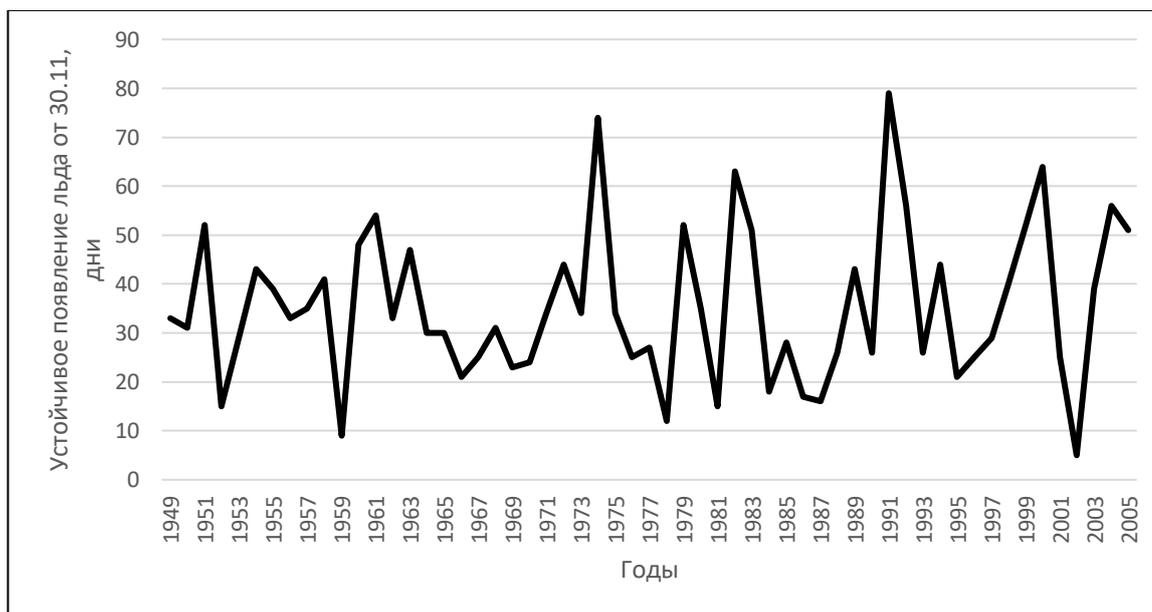


Рисунок 4.1 - Среднегодовой ход дат полного замерзания Лужской губы в период с 1949 по 2005 год

Из рисунка 4.1 мы видим, что даты устойчивого появления льда (далее – УПЛ) в Лужской губе из года в год разные. После локальных минимумов, через 1-3 года наступают локальные максимумы, то есть после холодной зимы наступает зима теплее предыдущей. Самая холодная зима (самое раннее появление льда) наблюдалось в 2002 году, самая теплая (самое позднее появления льда) наблюдалось в 1991 году.

4.1.1. Первичные статистики

Для ряда среднегодового хода дат УПЛ Лужской губе в период с 1949 по 2005 год были рассчитаны первичные статистики.

Таблица 4.1 - Первичные статистики ряда среднегодового хода УПЛ в Лужской губе

УПЛ		
Среднее	35,30	Дни
Стандартная ошибка	2,08	Дни
Медиана	33,00	Дни
Мода	25,00	
Стандартное отклонение	15,73	Дни
Дисперсия выборки	247,43	Дни ²
Экссесс	0,26	
Асимметричность	0,60	
Размах вариации	74,00	Дни
Минимум	5,00	Дни
Максимум	79,00	Дни
Коэффициент вариации	5,90	%

Далее на рисунок 4.1 были нанесены: среднее значение, стандартное отклонение и размах вариации.

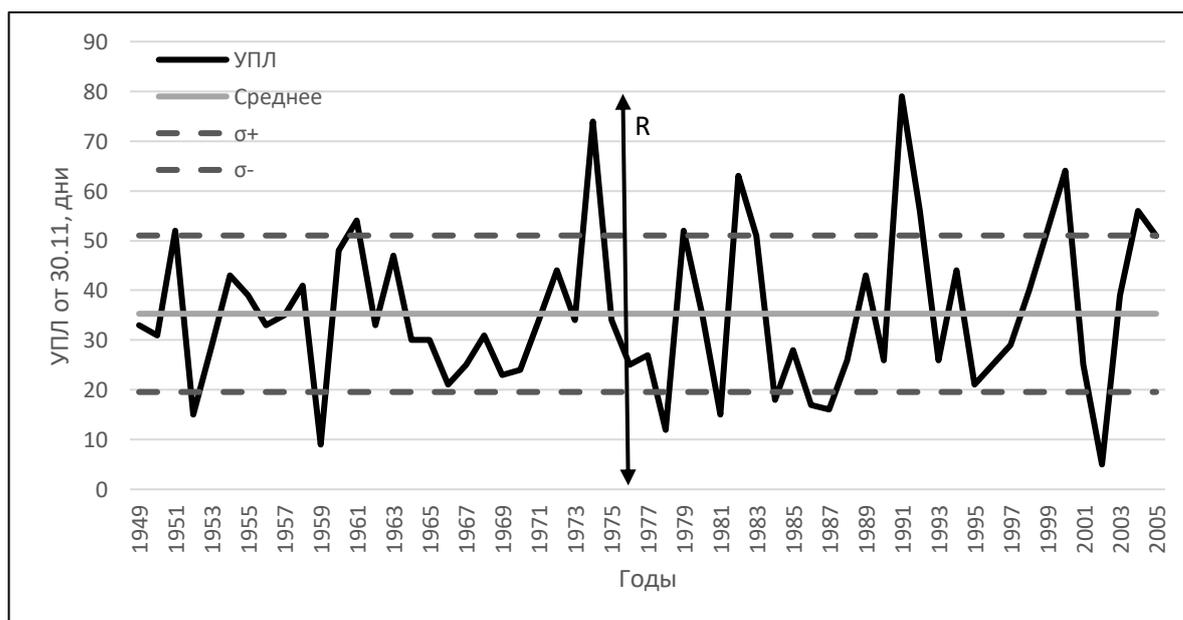


Рисунок 4.2 - Среднегодовая изменчивость УПЛ

* * σ^+ и σ^- – стандартные ошибка от среднего значения; R – рамах вариации.

Из таблицы 4.1 мы видим, что размах вариации составил 74 дня, а среднее значение составляет 35,3 дней. Коэффициент вариации, который показывает какую долю среднего значения составляет её средний разброс, составляет 5,9% от среднего значения, что меньше 33%, что свидетельствует о слабом влиянии внешних факторов. следовательно, сила влияющих на исходный ряд факторов незначительна. Самое раннее появление УПЛ наблюдалось в 2002 году, лед полностью покрыл Лужскую губу 5 декабря. Самое позднее УПЛ наблюдалось 17 февраля 1991 года.

4.1.2. Расчет и оценка значимости трендов

Таблица 4.2 - Рассчитанные характеристики линейного тренда

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,10
R-квадрат	0,01
Нормированный R-квадрат	-0,01
Стандартная ошибка	15,79
Наблюдения	57

Дисперсионный анализ				
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>
Регрессия	1	135,90	135,90	0,54
Остаток	55	13720,03	249,46	
Итого	56	13855,93		

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика
УПЛ	32,58	4,24	7,68
ti (a1)	0,09	0,13	0,74

Для оценки значимости линейного тренда необходимо проверить его множественный R, он же коэффициент корреляции r . Для того, чтобы его проверить формулируется нулевая гипотеза $H_0: r = 0$ и альтернативная $H_1: r \neq$

0. Для проверки гипотез используется статистический критерий Стьюдента, рассчитаем его критическое значение $t_{кр}$, а также критерий Стьюдента t^* .

$$t^* = 0,74$$

$$t_{кр} = 2,00$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$0,74 < 2,00$, нулевая гипотеза верна, коэффициент корреляции $r = 0,01$ статистически незначим, линейный тренд не влияет на изменчивость исходного ряда.

Таблица 4.3 - Рассчитанные характеристики нелинейного тренда

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,14
R-квадрат	0,02
Нормированный R-квадрат	-0,02
Стандартная ошибка	15,87
Наблюдения	57

Дисперсионный анализ				
	df	SS	MS	F
Регрессия	2	261,16	130,58	0,52
Остаток	54	13594,77	251,75	
Итого	56	13855,93		

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика
УПЛ	36,07	6,53	5,52
ti (a1)	-0,26	0,52	-0,50
ti^2 (a2)	0,01	0,01	0,71

Для оценки значимости нелинейного тренда, нужно проверить его множественный R, он же корреляционное отношение η . Чтобы его проверить формулируется нулевая гипотеза $H_0: \eta = 0$ и альтернативная $H_1: \eta \neq 0$. Для проверки гипотез используется статистический критерий Стьюдента, рассчитаем его критическое значение $t_{кр}$, а также критерий Стьюдента t^* .

$$t^* = 1,04$$

$$t_{кр} = 2,00$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$1,04 < 2,00$, нулевая гипотеза верна, корреляционное отношение $\eta = 0,02$ незначимо, нелинейный тренд не влияет на изменчивость исходного ряда.

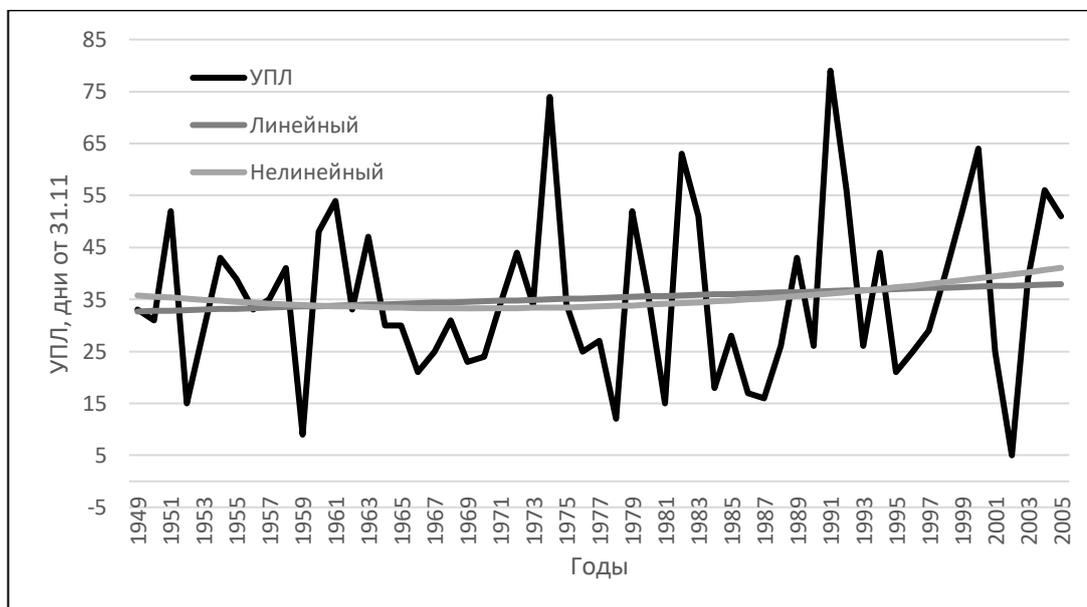


Рисунок 4.3 - Среднегодовой ход УПЛ и ее линейный и нелинейный тренды

Уравнение линейного тренда: $T_w = 0,09 * t + 32,58$

Уравнение нелинейного тренда: $T_w = 0,01 * t^2 - 0,26 * t + 36,07$

Линейный тренд постоянно растет, нелинейный тренд падает до 1969 года, дальше показывает рост. Величина тренда равна коэффициенту a_1 линейного тренда и имеет размерность характеристики y за единицу дискретности. $a_1 = 0,09$ дней/год. Тогда величина тренда $Tr = 0,9$ дней/10 лет. Ни один из трендов не влияет на изменчивость исходного ряда.

4.1.3. Гармонический анализ

Тренды не вносят значительного вклада в дисперсию исходного ряда. Для расчета отклонений, с помощью которых определяются гармоники, необходимо вычесть тренд, в данном случае вычитаем нелинейный тренд, так как его вклад в дисперсию выше на 1%, чем у линейного.

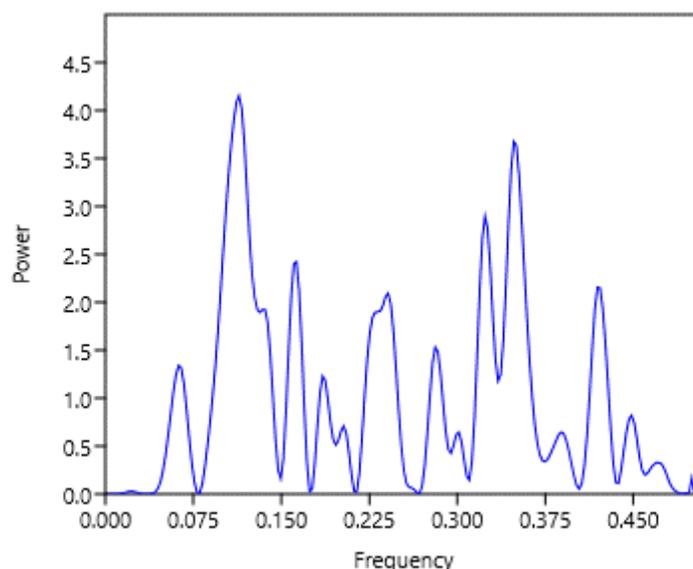


Рисунок 4.4 - Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений УПЛ.

По периодограмме (рисунок 4.4) определяем частоты гармоник (ω), которые соответствуют пикам периодограммы. В данном случае их 9:

$$\omega = 0,06 \text{ (год}^{-1}\text{)}$$

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

$$\omega = 0,16 \text{ (год}^{-1}\text{)}$$

$$\omega = 0,19 \text{ (год}^{-1}\text{)}$$

$$\omega = 0,24 \text{ (год}^{-1}\text{)}$$

$$\omega = 0,28 \text{ (год}^{-1}\text{)}$$

$$\omega = 0,32 \text{ (год}^{-1}\text{)}$$

$$\omega = 0,35 \text{ (год}^{-1}\text{)}$$

$$\omega = 0,42 \text{ (год}^{-1}\text{)}$$

Таблица 4.4 - Расчет характеристик гармоник

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
$\omega \text{ год}^{-1}$	0,06	0,11	0,16	0,19	0,24	0,28	0,32	0,35	0,42
T	16,0	8,8	6,1	5,4	4,1	3,6	3,1	2,9	2,4
$\omega \text{ рад/с}$	0,39	0,71	1,02	1,16	1,51	1,77	2,03	2,19	2,64
a	-4,71	-7,48	6,42	-0,18	2,55	2,55	1,95	3,23	5,04
b	-0,66	3,87	0,98	-4,57	-5,36	-3,36	6,73	7,14	3,22
A	4,76	8,42	6,49	4,57	5,93	4,22	7,00	7,83	5,98
$\phi \text{ рад}$	4,57	-1,09	1,42	3,18	2,70	2,49	0,28	0,42	4,14
$\phi \text{ год}$	11,7	-1,5	1,4	2,7	1,8	1,4	0,1	0,2	1,6
D	11,32	35,46	21,09	10,45	17,60	8,89	24,53	30,68	17,91
V	0,047	0,146	0,087	0,043	0,073	0,037	0,101	0,126	0,074

Проверка гармоник на значимость.

Вклад гармоники в общую дисперсию ряда (V из таблицы 4.4) – аналогичен коэффициенту детерминации (r^2), следовательно, может быть проверен на значимость тем же способом, что и коэффициент детерминации. Для оценки значимости формулируется нулевая гипотеза $H_0: r = 0$ и альтернативная $H_1: r \neq 0$. Для проверки гипотез используется статистический критерий Стьюдента, рассчитаем его критическое значение $t_{кр}$, а также критерий Стьюдента t^* .

Гармоника 1 (G1).

$$t^* = 1,68$$
$$t_{кр} = 2,00$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$1,68 < 2,00$, нулевая гипотеза верна. Первая гармоника, со вкладом в дисперсию исходного ряда в 5% ($V = 0,047 = 4,7\%$), незначима.

Гармоника 2 (G2).

$$t^* = 3,32$$
$$t_{кр} = 2,00$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$3,32 > 2,00$, нулевая гипотеза отвергается. Вторая гармоника вносит значимый вклад в общую дисперсию ряда отклонений (14,6%).

Гармоника 3 (G3).

$$t^* = 2,39$$
$$t_{кр} = 2,00$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$2,39 > 2,00$, нулевая гипотеза отвергается. Третья гармоника вносит значимый вклад в общую дисперсию ряда отклонений (8,7%).

Гармоника 4 (G4).

$$t^* = 1,61$$
$$t_{кр} = 2,00$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$1,61 < 2,00$, нулевая гипотеза верна. Четвертая гармоника, со вкладом в дисперсию исходного ряда в 4,3% незначима.

Гармоника 5 (G5).

$$\begin{aligned}t^* &= 2,15 \\t_{кр} &= 2,00\end{aligned}$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$2,15 > 2,00$, нулевая гипотеза отвергается. Пятая гармоника вносит значимый вклад в общую дисперсию ряда отклонений (7,3%).

Гармоника 6 (G6).

$$\begin{aligned}t^* &= 1,47 \\t_{кр} &= 2,00\end{aligned}$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$1,47 < 2,00$, нулевая гипотеза верна. Шестая гармоника, со вкладом в дисперсию исходного ряда в 3,7% незначима.

Гармоника 7 (G7).

$$\begin{aligned}t^* &= 2,62 \\t_{кр} &= 2,00\end{aligned}$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$2,62 > 2,00$, нулевая гипотеза отвергается. Седьмая гармоника вносит значимый вклад в общую дисперсию ряда отклонений (10,1%).

Гармоника 8 (G8).

$$\begin{aligned}t^* &= 3,02 \\t_{кр} &= 2,00\end{aligned}$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$3,02 > 2,00$, нулевая гипотеза отвергается. Восьмая гармоника вносит значимый вклад в общую дисперсию ряда отклонений (12,6%).

Гармоника 9 (G9).

$$\begin{aligned}t^* &= 2,17 \\t_{кр} &= 2,00\end{aligned}$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$2,17 > 2,00$, нулевая гипотеза отвергается. Девятая гармоника вносит значимый вклад в общую дисперсию ряда отклонений (7,4%).

Проверка гармоник на значимость показала, что значительный вклад в дисперсию ряда отклонений вносят только 6 гармоник из 9 выявленных.

Восстанавливаем ряд отклонений по уравнениям значимых гармоник:

$$G_2 = 8,42 * \cos(0,71 * t_i - 1,09)$$

$$G_3 = 6,49 * \cos(1,02 * t_i - 1,42)$$

$$G_5 = 5,93 * \cos(1,51 * t_i - 2,7)$$

$$G_7 = 7,00 * \cos(2,03 * t_i - 0,28)$$

$$G_8 = 7,83 * \cos(2,19 * t_i - 0,47)$$

$$G_9 = 5,98 * \cos(2,64 * t_i - 1,00)$$

После расчета каждой гармоники по отдельности нужно их сложить. После чего строим совмещенный график хода отклонений и суммы гармоник.

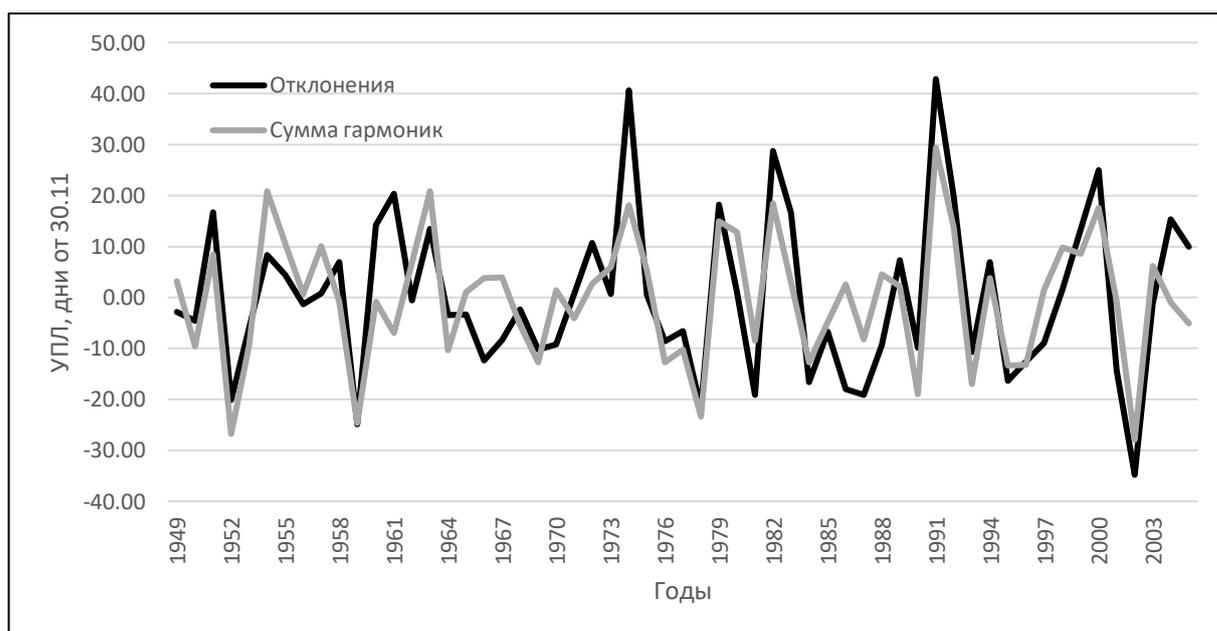


Рисунок 4.5 - Совмещенный график хода отклонений и суммы гармоник

Исходя из расчета и анализа гармоник были выявлены гармонические колебания с периодом в 8,8; 6,1; 4,1; 3,1; 2,9; 2,4; лет. Каждое из них вносит значительный вклад в дисперсию исходного ряда.

Гармоника с периодом 8,8 лет может быть связана с 7-8-летним циклом нутаций магнитных полей Земли. Годовая фаза составляет 1,5 года. Это значит,

что в течение каждого 8,8-летнего периода (~105 месяцев) первый максимум наступает спустя 1,5 года (18 месяцев) от его начала. В интервале с 1 января 1949 года по 1 октября 1957 года первый максимум приходится на 1 июня 1950 года.

Гармоника с периодом 6,1 лет может быть связана с 6-летним североатлантическим климатическим циклом колебаний температуры и осадков, связанных с атмосферными и океаническими процессами, а также с 5-6-летним циклом автоколебательности системы океан-атмосфера. Годовая фаза составляет 1,4 года. Это значит, что в течении каждого 6,1-летнего периода (~72 месяца) первый максимум наступает спустя 1,4 года (~17 месяцев) от его начала. В интервале с 1 января 1949 года по 1 февраля 1955 года первый максимум приходится на 1 мая 1950 года.

Гармоника с периодом в 4,1 года связана с 2–4-летним циклом Балтийского колебания, а также с 4-летним циклом колебаний переноса свойств в верхней тропосфере. Годовая фаза составляет 1,8 года. Это значит, что в течении каждого 4,1-летнего периода (~49 месяцев) первый максимум наступает спустя 1,8 года (~22 месяца) от его начала. В период с 1 января 1949 года по 1 февраля 1953 года первый максимум наступит 1 ноября 1950 года.

Гармоники с периодами 3,1; 2,9 и 2,4 года также связаны с 2–4-летним циклом Балтийского колебания. Их годовая фаза практически совпадает: у 3,1-летнего периода она составляет 0,1 года, у 2,9-летнего — 0,2 года, а у 2,4-летнего — 0,4 года.

Наибольший вклад в дисперсию составляет 14,6% у второй гармоники, а наименьший — 7,3% у пятой. Суммарный вклад в дисперсию всех гармоник — 60,7%. По рисунку 4.5 видно, что гармоники хорошо описывают среднегодовой ход значений отклонений исходного ряда УПЛ.

Для наглядности было выполнено вейвлет-преобразование ряда отклонений УПЛ.

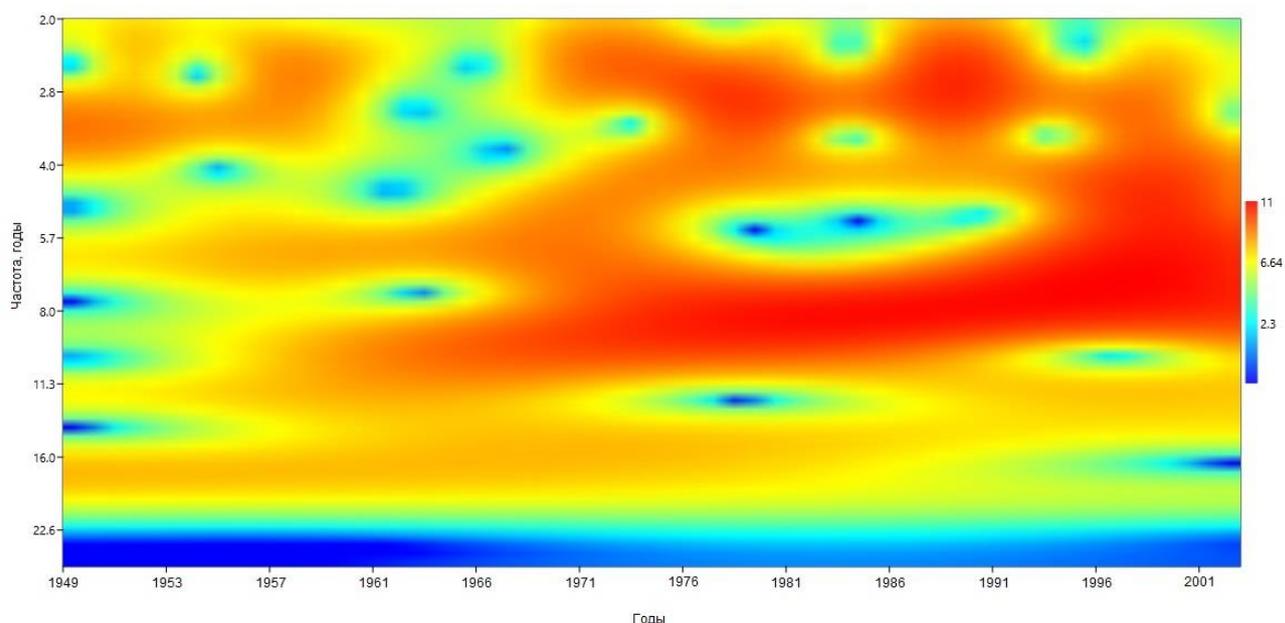


Рисунок 4.6 - Вейвлет-преобразование ряда отклонений УПЛ

На рисунке 4.6 особенно хорошо видно, что на частотах от 2 до 8 лет наблюдается наибольший вклад в дисперсию, составляющий в среднем 8-9%. Наибольший вклад приходится на период с 1971 по 2005 годы. При этом на частоте 11 лет и выше вклад значительно меньше.

Таблица 4.5 - Вклад в дисперсию детерминированной и стохастической части ряда

	Дисперсия, дни ²	Часть от общей дисперсии, %
Исходный ряд	247,43	100
Тренд	4,66	2
Гармоники	157,95	64
Шум	84,82	34

Анализ данных в таблице 4.5 показывает, что основным фактором, определяющим общую дисперсию ряда УПЛ, являются периодические колебания. В то же время вклад тренда минимален, что свидетельствует об отсутствии ярко выраженного роста или падения. Доля случайной составляющей составляет 34%, что указывает на отсутствие хаотичности в процессе, но вместе с тем ограничивает его предсказуемость.

4.2. Прогнозирование УПЛ

Прогноз УПЛ будет осуществляться с помощью комплексов программ «ASAP+» и «PRISMA».

Прогнозирование комплексом «ASAP+»

Таблица 4.6 – результаты расчета прогноза комплекса «ASAP+»

Метод	Надежность	Заблаговр.	Средн. Ошиб.	Дисп. Ошиб.	Опр. Знак	Опр 0.67 σ	Опр 0.80 σ
Климатический	0.97	0.00	-1.53	320.62	44.12	50.00	52.94
Инерционный	1.72	0.00	-0.50	569.13	50.00	44.12	44.12
Байессовский	1.55	0.00	4.12	510.47	50.00	38.24	44.12
Дин-стат.	1.41	0.00	-4.48	465.53	41.18	35.29	47.06
Дин-стох.	1.36	0.00	-0.75	450.45	50.00	35.29	47.06
AP1	1.00	0.00	-1.62	328.69	50.00	50.00	52.94
AP2	0.98	0.00	-1.45	324.37	52.94	50.00	52.94
AP3	1.01	0.00	-1.45	334.79	44.12	50.00	52.94
Фурье	1.20	0.00	0.44	397.23	41.18	44.12	47.06
Сред. Компл.	1.02	0.00	-0.80	338.10	41.18	50.00	52.94
Регр. Компл.	0.80	1.86	0.12	264.80	64.71	61.76	61.76

Из таблицы 4.6 мы видим, что комплекс «ASAP+» просчитал параметры каждой статистико-вероятностной модели. По результатам анализа и проверки каждого метода было выявлено, что метод регрессионной комплексации прогнозов самый лучший для прогнозирования. У данного метода наилучшая надежность, наименьшие ошибки, наивысшая оправдываемость среди всех методов, а также этот метод единственный показал предельную заблаговременность прогноза.

По результатам прогнозирования данным методом мы получаем, что УПЛ в Лужской губе наступит:

В 2006 году, на 31 день от 30.11 +/- 16 дней;

В 2007 году на 33 день от 30.11 +/-16 дней.

Прогнозирование комплексом «PRISMA»

Добавив к расчетам по «ASAP+» полосовую фильтрацию (упрощение структуры ряда) получаем:

В 2006 году УПЛ наступит на 45 день от 30.11 +/-16 дней;

В 2007 году на 37 день от 30.11 +/-16 дней.

4.3. Выводы по главе

В данной главе был выполнен статистический анализ и попытка прогнозирования, с заблаговременностью 2 года, даты наступления УПЛ.

Анализ ряда дат УПЛ показал, что как таковых тенденций в ряде не присутствует, а наибольшее влияние на изменчивость исходного ряда оказывают гармонические колебания и стохастические параметры.

Прогнозирование дат наступления УПЛ климатическим методом прогнозирования показало:

УПЛ, в 2006 году, наступит на 35 день от 30.11 +/- 16 дней, в 2007 году – аналогично (таблица 4.1)

Прогнозирование комплексом программ «ASAP+», показало следующий результат:

В 2006 году УПЛ наступит на 31 день от 30.11 +/- 16 дней;

В 2007 году на 33 день от 30.11 +/-16 дней.

Прогнозирование производилось по методу регрессионной комплексации (регрессионная модель, построенная по результатам методического независимого прогнозирования комплекса статистических моделей). Данная модель оказалась наилучшей по всем параметрам по сравнению с остальными (таблица 4.6). По данной таблице предельная теоретическая заблаговременность 2 года.

Прогностическая модель может быть рекомендована для оперативного прогнозирования, ибо её оправдываемость по знаку и критерию срочности более чем на 12% превышает оправдываемость климатической модели [15].

В результате прогнозирования с использованием комплекса программ «PRISMA», было выявлено:

В 2006 году УПЛ наступит на 45 день от 30.11 +/-16 дней;

В 2007 году на 37 день от 30.11 +/-16 дней.

Методы «ASAP+» и «PRISMA» могут быть рекомендованы к прогнозу из-за превышения их оправдываемости по знаку и критерию срочности более чем на 12% по сравнению с климатической моделью, тем самым это даст нам возможность планировать проводку судов в период зимней навигации более рационально

ГЛАВА 5. Статистический анализ и прогнозирование окончательного очищения ото льда

5.1. Статистическое исследование среднегодового хода дат окончательного очищения льда в Лужской губе

На рисунке 5.1 изображен среднегодовой ход дат окончательного очищения ото льда в Лужской губы, для удобства эти даты, аналогично УПЛ, приведены в днях от 28.02.

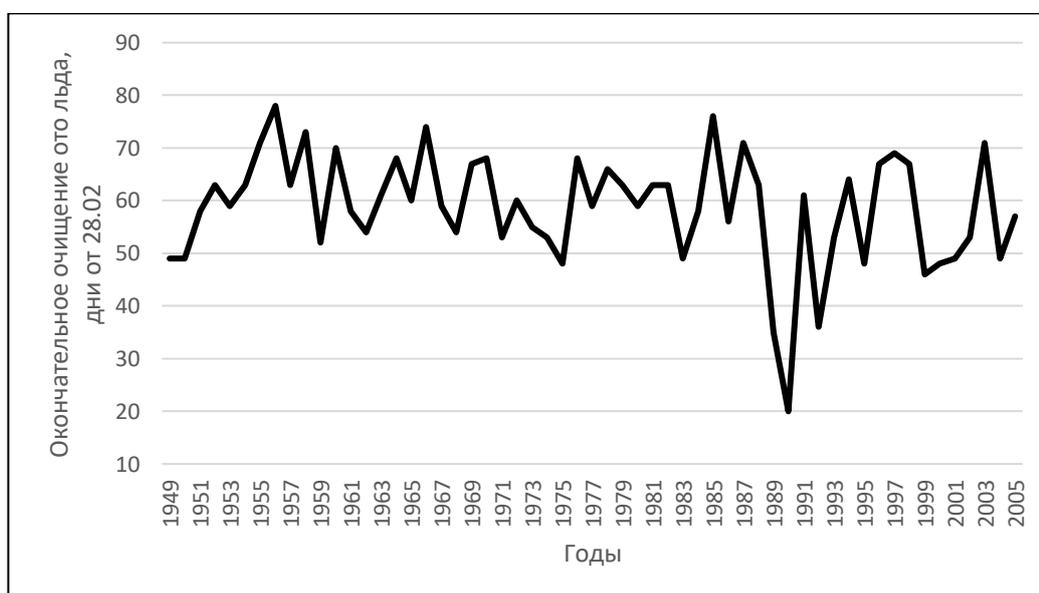


Рисунок 5.1 - Среднегодовой ход дат полного очищения льда в Лужской губе в период с 1949 по 2005 год

Из рисунка 5.1 мы видим, что даты полного очищения ото льда (далее – ООЛ) в Лужской губе из года в год разные. В основном, на 49-78 день от 28.02, за исключением сильного выброса в 1990 году, когда ото льда акватория очистилась на 20 марта, и в 1992 году – 5 апреля. Самая короткая зима (самое раннее очищения ото льда) наблюдалось в 1990 году, самая длинная (самое позднее очищение ото льда) наблюдалось в 1956 году.

5.1.1. Первичные статистики

Для ряда среднегодового хода дат ООЛ в Лужской губе в период с 1949 по 2005 год были рассчитаны первичные статистики.

Таблица 5.1 - Первичные статистики ряда среднегодового хода ООЛ в Лужской губе

ООЛ		
Среднее	58,72	Дни
Стандартная ошибка	1,40	Дни
Медиана	59,00	Дни
Мода	63,00	
Стандартное отклонение	10,59	Дни
Дисперсия выборки	112,21	Дни ²
Экссесс	2,22	
Асимметричность	-0,98	
Размах вариации	58,00	Дни
Минимум	20,00	Дни
Максимум	78,00	Дни
Коэффициент вариации	2,39	%

Далее на рисунок 5.1 были нанесены: среднее значение, стандартное отклонение и размах вариации.

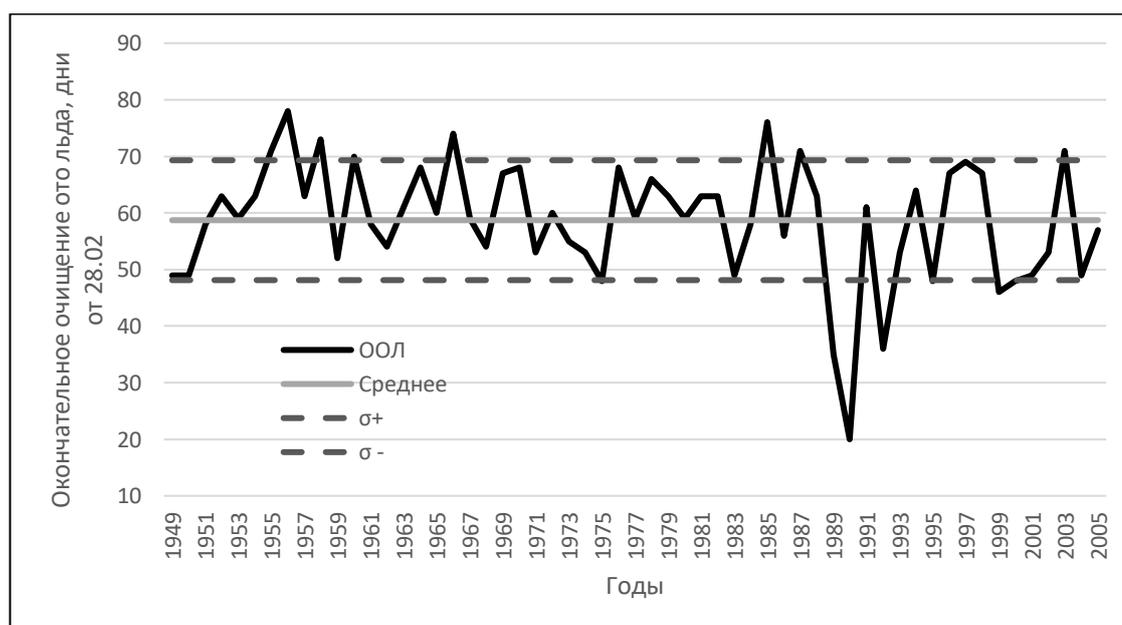


Рисунок 5.2 - Среднегодовая изменчивость ООЛ

* * σ^+ и σ^- – стандартная ошибка от среднего значения; R – размах вариации.

Из таблицы 5.1 мы видим, что размах вариации составил 58 дней, а среднее значение составляет 58,72 дня. Коэффициент вариации, который показывает какую долю среднего значения составляет её средний разброс, составляет 2,39% от среднего значения, что меньше 33%, что свидетельствует о слабом влиянии внешних факторов. следовательно, сила влияющих на исходный ряд факторов незначительна. Самое раннее ООЛ наблюдалось в 1990 году, акватория полностью очистилась 20 марта. Самое позднее ООЛ наблюдалось 17 мая 1956 года.

5.1.2. Расчет и оценка значимости трендов

Таблица 5.2 - Рассчитанные характеристики линейного тренда

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,24
R-квадрат	0,06
Нормированный R-квадрат	0,04
Стандартная ошибка	10,36
Наблюдения	57

Дисперсионный анализ				
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>
Регрессия	1	375,84	375,84	3,50
Остаток	55	5907,67	107,41	
Итого	56	6283,51		

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика
УПЛ	63,25	2,78	22,73
ti (a1)	-0,16	0,08	-1,87

Для оценки значимости линейного тренда необходимо проверить его множественный R, он же коэффициент корреляции r . Для того, чтобы его проверить формулируется нулевая гипотеза $H_0: r = 0$ и альтернативная $H_1: r \neq$

0. Для проверки гипотез используется статистический критерий Стьюдента, рассчитаем его критическое значение $t_{кр}$, а также критерий Стьюдента t^* .

$$t^* = 1,93$$

$$t_{кр} = 2,00$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$1,93 < 2,00$, нулевая гипотеза верна, коэффициент корреляции $r = 0,06$ статистически незначим, линейный тренд не влияет на изменчивость исходного ряда.

Таблица 5.3 - Рассчитанные характеристики нелинейного тренда

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,26
R-квадрат	0,07
Нормированный R-квадрат	0,03
Стандартная ошибка	10,43
Наблюдения	57

Дисперсионный анализ				
	df	SS	MS	F
Регрессия	2	409,13	204,57	1,88
Остаток	54	5874,38	108,78	
Итого	56	6283,51		

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика
УПЛ	61,44	4,29	14,31
ti (a1)	0,03	0,34	0,08
ti^2 (a2)	-0,003	0,01	-0,55

Для оценки значимости нелинейного тренда, нужно проверить его множественный R, он же корреляционное отношение η . Чтобы его проверить формулируется нулевая гипотеза $H_0: \eta = 0$ и альтернативная $H_1: \eta \neq 0$. Для проверки гипотез используется статистический критерий Стьюдента, рассчитаем его критическое значение $t_{кр}$, а также критерий Стьюдента t^* .

$$t^* = 2,02$$

$$t_{кр} = 2,00$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$2,02 > 2,00$, нулевая гипотеза отвергается, корреляционное отношение $\eta = 0,07$ незначимо, нелинейный тренд влияет на изменчивость исходного ряда.

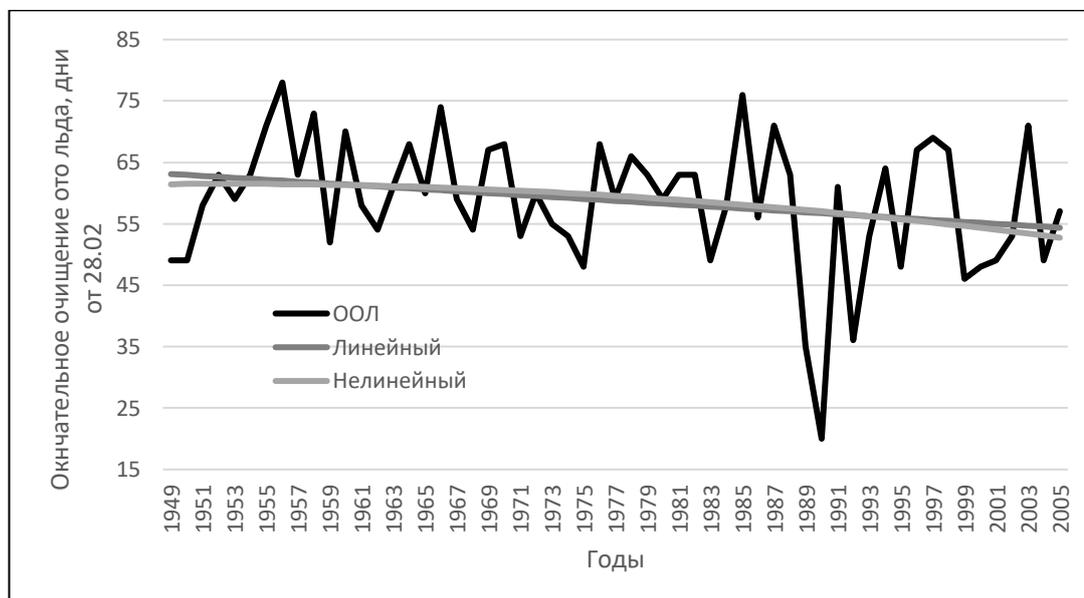


Рисунок 5.3 - Среднегодовой ход ООЛ и его линейный и нелинейный тренды

Уравнение линейного тренда: $T_w = -0,16 * t + 63,25$

Уравнение нелинейного тренда: $T_w = -0,003 * t^2 + 0,03 * t + 61,44$

Линейный тренд постоянно падает, нелинейный тренд растет до 1953 года, дальше - падает. Величина тренда равна коэффициенту a_1 линейного тренда и имеет размерность характеристики y за единицу дискретности. $a_1 = 0,16$ дней/год. Тогда величина тренда $Tr = 1,6$ дней/10 лет. Значительно влияет на исходный ряд только нелинейный тренд.

5.1.3. Гармонический анализ

Для расчета отклонений, с помощью которых определяются гармоники, необходимо вычесть тренд, в данном случае вычитаем нелинейный тренд, так как его вклад в дисперсию исходного ряда является значимым и превышает вклад линейного тренда на 1% (6% у линейного, 7% у нелинейного).

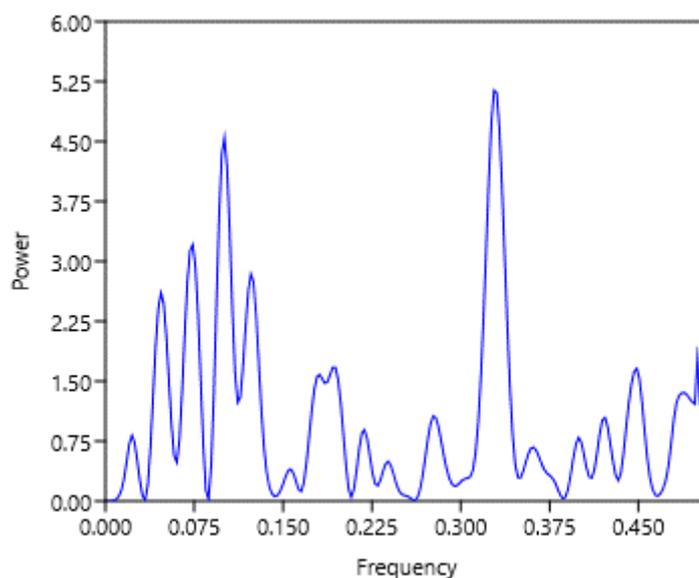


Рисунок 5.4 - Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений ООЛ

По периодограмме (рисунок 5.4) определяем частоты гармоник (ω), которые соответствуют пикам периодограммы. В данном случае их 4:

$$\begin{aligned} \omega &= 0,1 \text{ (год}^{-1}\text{)} \\ \omega &= 0,12 \text{ (год}^{-1}\text{)} \\ \omega &= 0,18 \text{ (год}^{-1}\text{)} \\ \omega &= 0,33 \text{ (год}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Таблица 5.4 - Расчет характеристик гармоник

	G1	G2	G3	G4
$\omega \text{ дни}^{-1}$	0,10	0,12	0,18	0,33
T	9,96	8,15	5,53	3,05
$\omega \text{ рад/с}$	0,63	0,77	1,14	2,06
a	3,86	6,10	2,90	6,01
b	-5,20	2,96	-1,88	2,30
A	6,48	6,78	3,46	6,44
$\phi \text{ рад}$	-0,64	4,26	-0,99	1,21
$\phi \text{ год}$	-1,01	5,53	-0,88	0,58
D	20,98	22,98	5,99	20,73
V	0,20	0,22	0,06	0,20

Проверка гармоник на значимость.

Вклад гармоники в общую дисперсию ряда (V из таблицы 5.4) – аналогичен коэффициенту детерминации (r^2), следовательно, может быть проверен на значимость тем же способом, что и коэффициент детерминации. Для оценки значимости формулируется нулевая гипотеза $H_0: r = 0$ и альтернативная $H_1: r \neq 0$. Для проверки гипотез используется статистический критерий Стьюдента, рассчитаем его критическое значение $t_{кр}$, а также критерий Стьюдента t^* .

Гармоника 1 (G1).

$$t^* = 4,15$$
$$t_{кр} = 2,00$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$4,15 > 2,00$, нулевая гипотеза отвергается. Первая гармоника, со вкладом в дисперсию исходного ряда в 20% ($V = 0,2 = 20\%$), значима.

Гармоника 2 (G2).

$$t^* = 4,45$$
$$t_{кр} = 2,00$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$4,45 > 2,00$, нулевая гипотеза отвергается. Вторая гармоника вносит значимый вклад в общую дисперсию ряда отклонений (22%).

Гармоника 3 (G3).

$$t^* = 1,88$$
$$t_{кр} = 2,00$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$1,88 < 2,00$, нулевая гипотеза верна. Третья гармоника не вносит значимый вклад в общую дисперсию ряда отклонений (6%).

Гармоника 4 (G4).

$$t^* = 4,11$$
$$t_{кр} = 2,00$$

Сравниваем t^* с $t_{кр}$

$4,11 > 2,00$, нулевая гипотеза отвергается. Четвертая гармоника, со вкладом в дисперсию исходного ряда в 20% значима.

Проверка гармоник на значимость показала, что значительный вклад в дисперсию ряда отклонений вносят только 3 гармоники из 5 выявленных.

Восстанавливаем ряд отклонений по уравнениям значимых гармоник:

$$G_1 = 6,48 * \cos(0,63 * t_i + 0,64)$$

$$G_2 = 6,78 * \cos(0,77 * t_i - 4,26)$$

$$G_4 = 6,44 * \cos(2,06 * t_i - 1,21)$$

После расчета каждой гармоники по отдельности нужно их сложить. После чего строим совмещенный график хода отклонений и суммы гармоник.

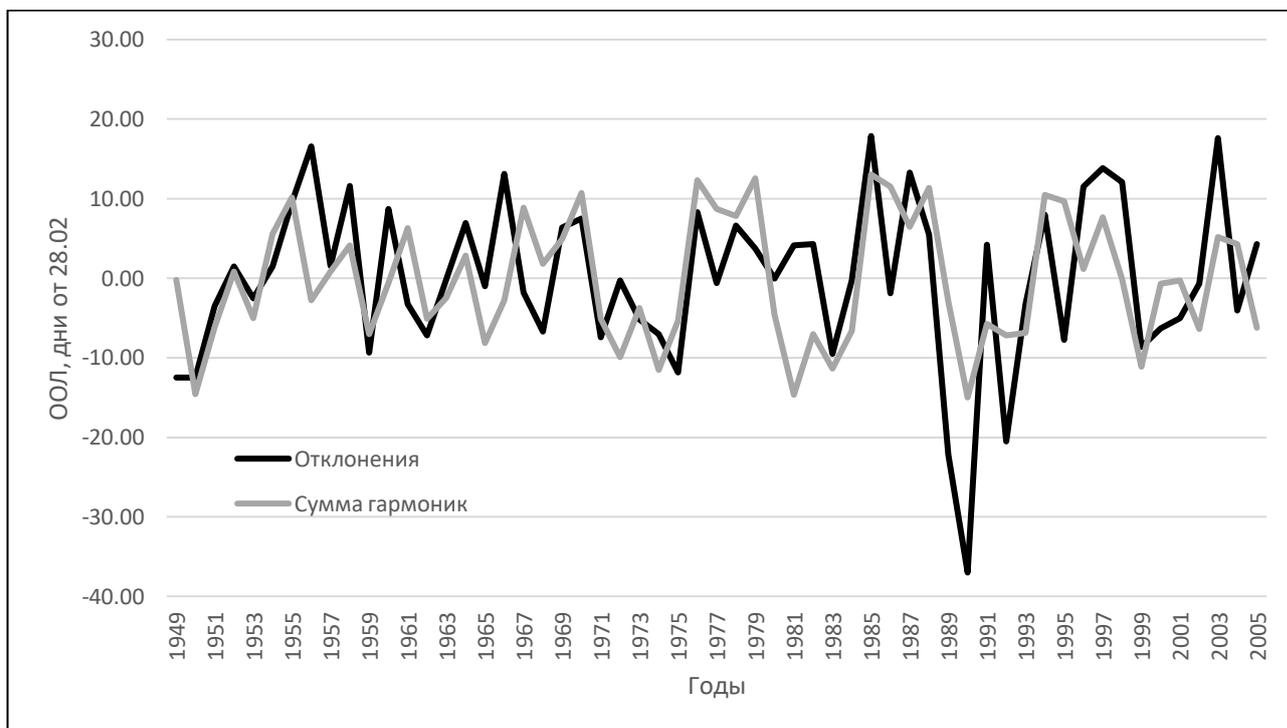


Рисунок 5.5 - Совмещенный график хода отклонений и суммы гармоник

Исходя из расчета и анализа гармоник были выявлены гармонические колебания с периодом в 10, 8,1 и 3,6 лет. Каждое из них вносит значительный вклад в дисперсию исходного ряда.

Гармоника с периодом 10 лет может быть связана с 10-летним циклом ледового покрова. Ледовая обстановка в Финском заливе подтвержена

десятилетним колебаниям из-за изменений температуры Балтийского моря. Годовая фаза составляет 1 год. Это значит, что в течение каждого 10-летнего периода (120 месяцев) первый максимум наступает спустя 1 год (12 месяцев) от его начала. В интервале с 1 января 1949 года по 1 января 1959 года первый максимум приходится на 1 января 1950 года.

Гармоника с периодом 8,1 года может быть связана с 7-8-летним циклом нутаций магнитных полей Земли, что прямо согласуется с рисунком 2.8. Годовая фаза составляет 5,5 лет. Это значит, что в течении каждого 8,1-летнего периода (~97 месяцев) первый максимум наступает спустя 5,5 года (66 месяцев) от его начала. В интервале с 1 января 1949 года по 1 февраля 1957 года первый максимум приходится на 1 июня 1954 года.

Гармоника с периодом в 3,6 года связана с 2–4-летним циклом Балтийского колебания, а также с 4-летним циклом колебаний переноса свойств в верхней тропосфере. Годовая фаза составляет 0,6 года. Это значит, что в течении каждого 3,6-летнего периода (~43 месяца) первый максимум наступает спустя 0,6 года (~7 месяцев) от его начала. В период с 1 января 1949 года по 1 июля 1952 года первый максимум наступит 1 июля 1949 года.

Наибольший вклад в дисперсию составляет 22% у второй гармоники, а у первой и третьей по 20%. Суммарный вклад в дисперсию всех гармоник – 62%. По рисунку 5.5 видно, что гармоники хорошо описывают среднегодовой ход значений отклонений исходного ряда ООЛ.

Для наглядности было выполнено вейвлет-преобразование ряда отклонений ООЛ.

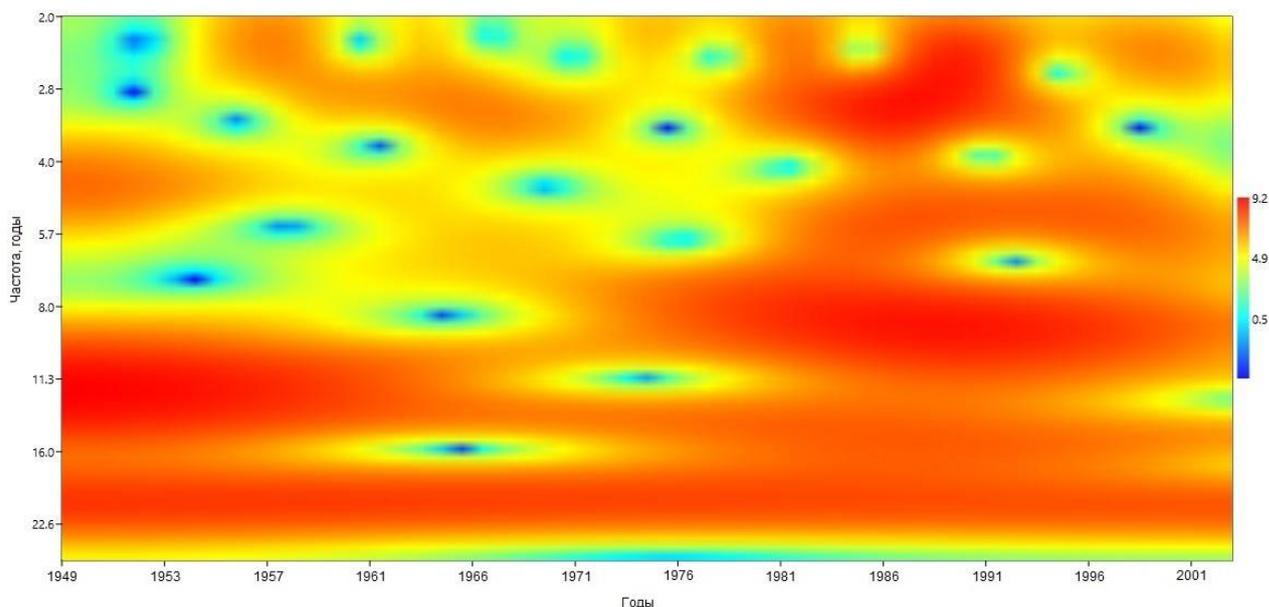


Рисунок 5.6 - Вейвлет-преобразование ряда отклонений ООЛ

На рисунке 5.6 особенно хорошо видно, что на частотах от 2 до 6 лет в период с 1978 по 1998 наблюдался высокий вклад в дисперсию. На 11 летней и 22 летней частоте максимальный вклад в дисперсию наблюдается на протяжении всего периода, что доказывает нам сильное влияние 11-летнего цикла солнечной активности на ООЛ. Эти данные прямо согласуются со спектром ледового покрова (рисунок 2.8).

Таблица 5.5 - Вклад в дисперсию детерминированной и стохастической части ряда

	Дисперсия, дни ²	Часть от общей дисперсии, %
Исходный ряд	112,00	100
Тренд	7,84	7
Гармоники	69,44	62
Шум	34,72	31

Анализ данных в таблице 5.5 показывает, что основным фактором, определяющим общую дисперсию ряда УПЛ, являются периодические колебания. В то же время вклад тренда минимален, что свидетельствует об

отсутствии ярко выраженного роста или падения. Доля случайной составляющей составляет 31%, что указывает на отсутствие хаотичности в процессе, но вместе с тем ограничивает его предсказуемость.

5.2. Прогнозирование ООЛ

Прогноз ООЛ будет осуществляться с помощью комплексов программ «ASAP+» и «PRISMA».

Прогнозирование комплексом «ASAP+»

Таблица 5.6 – результаты расчета прогноза комплекса «ASAP+»

Метод	Надежность	Заблаговр.	Средн. Ошиб.	Дисп. Ошиб.	Опр. Знак	Опр 0.67 σ	Опр 0.80 σ
Климатический	0.97	0.00	1.94	126.78	50.00	50.00	55.56
Инерционный	1.68	0.00	0.28	218.65	52.78	41.67	52.78
Байессовский	1.38	0.00	3.20	180.19	52.78	50.00	52.78
Дин-стат.	1.39	0.00	2.83	181.30		47.22	52.78
Дин-стох.	1.32	0.00	0.68	172.32	52.78	52.78	52.78
AP1	1.02	0.00	1.59	133.07	50.00	50.00	58.33
AP2	1.08	0.00	1.73	141.02	47.22	50.00	55.56
AP3	1.11	0.00	1.64	144.61	47.22	47.22	55.56
Фурье	0.99	0.00	6.22	129.11	50.00	38.89	47.22
Сред. Компл.	1.04	0.00	0.85	136.10	52.78	52.78	63.89
Регр. Компл.	0.54	3.86	-0.01	70.49	75.00	61.11	66.67

Из таблицы 5.6 мы видим, что комплекс «ASAP+» просчитал параметры каждой статистико-вероятностной модели. По результатам анализа и проверки каждого метода было выявлено, что метод регрессионной комплексации прогнозов самый лучший для прогнозирования. У данного метода наилучшая надежность, наименьшие ошибки, наивысшая оправдываемость среди всех методов, а также этот метод единственный показал предельную заблаговременность прогноза.

По результатам прогнозирования данным методом мы получаем, что ООЛ в Лужской губе наступит:

В 2006 году, на 59 день от 28.02 +/- 11 дней;

В 2007 году на 65 день от 28.02 +/-10 дней.

Прогнозирование комплексом «PRISMA»

Добавив к расчетам по «ASAP+» полосовую фильтрацию (упрощение структуры ряда) получаем:

В 2006 году ООЛ наступит на 58 день от 28.02 +/-10 дней;

В 2007 году на 57 день от 28.02 +/-10 дней.

5.3. Выводы по главе

В данной главе был выполнен статистический анализ и попытка прогнозирования, с заблаговременностью 2 года, даты наступления ООЛ.

Анализ ряда дат ООЛ показал, что как таковых тенденций в ряде не присутствует, а наибольшее влияние на изменчивость исходного ряда оказывают гармонические колебания и стохастические параметры.

Прогнозирование дат наступления ООЛ по климату показало:

УПЛ, в 2006 году, наступит на 59 день от 28.02 +/- 11 дней, в 2007 году – аналогично (таблица 5.1)

Прогнозирование комплексом программ «ASAP+», показало следующий результат:

В 2006 году ООЛ наступит на 59 день от 28.02 +/- 11 дней;

В 2007 году на 65 день от 28.02 +/-10 дней.

Прогнозирование производилось по методу регрессионной комплексации (регрессионная модель, построенная по результатам методического независимого прогнозирования комплекса статистических моделей). Данная модель оказалась наилучшей по всем параметрам по сравнению с остальными (таблица 5.6). По данной таблице предельная теоретическая заблаговременность 4 года, но в данном случае, ограничимся 2 годами.

Прогностическая модель может быть рекомендована для оперативного прогнозирования, ибо её оправдываемость по знаку и критерию срочности более чем на 12% превышает оправдываемость климатической модели [15].

В результате прогнозирования с использованием комплекса программ «PRISMA», было выявлено:

В 2006 году ООЛ наступит на 58 день от 31.02 \pm 10 дней;

В 2007 году на 57 день от 31.02 \pm 10 дней.

Методы «ASAP+» и «PRISMA» могут быть рекомендованы к прогнозу из-за превышения их оправдываемости по знаку и критерию срочности более чем на 12% по сравнению с климатической моделью, тем самым это даст нам возможность планировать проводку судов в период зимней навигации более рационально

ГЛАВА 6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ ФАЗ ДЛЯ ОБЕСПЧЕНИЯ ЗИМНЕЙ НАВИГАЦИИ ПОРТА УСТЬ-ЛУГА.

Для обеспечения проходимости судов в период зимней навигации порту «Усть-Луга» необходимо пользоваться услугами ледокольных служб. Чем раньше заказчики договорятся с ледокольной службой, тем дешевле обойдутся данные услуги. Чтобы заранее знать в какой период потребуются услуги необходимо тщательно спрогнозировать дату устойчивого появления льда в районе Лужской губы. Чем точнее будет эта дата, тем больше средств удастся сэкономить порту.

Метод прогнозирования, используемый в порту «Усть-Луга», при прогнозировании прибытия ледокола – климатический. Данный метод, согласно таблицам 4.6 и 5.6 является менее надежным по сравнению с методом регрессионной комплексации.

Согласно климатическому прогнозу на год вперед ледокол должен прибыть 04.01.2006 \pm 16 дней, а закончить свою работу 27.04.2006 \pm 10 дней. Прогноз на 2 года вперед определяет аналогичные даты.

Метод регрессионной комплексации показал иной результат. Прогноз на год определяет сроки с 31.12.2005 \pm 16 дней по 28.04.2006 \pm 11 дней. На два года – с 02.01.2007 \pm 16 дней по 04.05.2007 \pm 10 дней.

Метод регрессионной комплексации с применением полосовой фильтрации показал, что сроки на год вперед – с 14.01.2006 \pm 16 дней по 27.04.2006 \pm 10 дней, на два года - с 06.01.2007 \pm 16 дней по 26.04.2007 \pm 10 дней.

Смоделируем ситуацию. Лед встал раньше на 4 дня, чем изначально прогнозировалось (климатическим методом), следовательно, суда не смогут войти в порт, ибо ледокол еще не прибыл для выполнения работ по очищению акватории ото льда. В среднем, в порт прибывает по 10 судов в сутки. Аренда

судна для судовладельца составляет $\approx 4\,500$ € в сутки, за 10 судов за 4 дня простоя судовладельцы теряют $\approx 180\,000$ €, но так как не была вовремя обеспечена возможность проходимости судов, то возмещать потери судовладельцам обязан именно порт. Также стоит отметить, что если судно не разгрузится вовремя, то и товар, перевозимый судном, для конечного пользователя доставят позднее, клиент будет недоволен. Все это можно списать на сопутствующие факторы, эти риски, скорее всего, застрахованы, но репутационный ущерб невосполним. Лучше было бы, если бы ледокол пришел раньше, но порт не потерял возможности обеспечивать проходимость судов, да и со стороны контрагентов было бы меньше вопросов. За 4 дня простоя ледокола, учитывая, что аренда ледокола обойдется порту в $\approx 5\,000$ € в сутки, порт потратил $\approx 20\,000$ €, что на $\approx 160\,000$ € меньше, чем восполнять потери судовладельцев из-за несвоевременного обеспечения проходимости судов.

В нашем случае ситуация иная. Согласно прогнозу климатическим методом, лед встанет 04.01.2006, а по-нашему, более надежному, прогнозу методом регрессионной комплексации только 14.01.2006. В данном случае простаивать будет уже ледокол, а его простой обойдется $\approx 5\,0000$ €.

Подобные примеры доказывают, что ледокол необходимо заказывать заранее.

Так как, независимо от метода прогнозирования, прогноз получается интервальным, то необходимо предусмотреть то, чтобы при заключении договора учитывалась σ . Также следует предусмотреть возможность подготовки выхода судна в пределах этой σ .

Подытожим:

По климатическому методу прогнозирования, в 2006 и 2007 году ледоколу необходимо находиться в акватории в период с 04.01.2006 по 27.04.2006, что составляет 114 дней.

По методу регрессионной комплексации с применением полосовой фильтрации в 2006 году с 14.01.2006 по 27.04.2006, а в 2007 году с 06.01.2007 по

26.04.2007, что составляет 104 дня в 2006 году и 111 дней в 2007 году соответственно.

Используя климатический метод порт затратит на ледокольные услуги $\approx 570\ 000\text{€}$ в 2006 и 2007 годах. По нашему прогнозу затраты порта составят: $\approx 520\ 000\text{€}$ в 2006 году, и $\approx 555\ 000\text{€}$ в 2007 году. Экономия порта за 2 года при использовании нашего прогноза составляет: $\approx 65\ 000\text{€}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе продемонстрирована возможность сверхдолгосрочного прогнозирования для обеспечения зимней навигации порта «Усть-Луга». Показано, что структура временных рядов достаточно сложна, что затрудняет их описание и прогнозирование. Это подтверждает нецелесообразность климатического прогнозирования.

Также продемонстрирована принципиальная возможность применения статистических методов для аппроксимации и экстраполяции ледовых характеристик. Выявлено, что использование полосовой фильтрации значительно повышает методическую обоснованность независимых прогнозов, а следовательно, и точность итогового прогноза.

Кроме того, показано, что применение статистических моделей и комплексов «ASAP+» и «PRISMA» способствует более рациональному использованию ресурсов и финансов в целях обеспечения зимней навигации. В нашем случае за два года порту «Усть-Луга» удалось сэкономить $\approx 65\ 000$ €.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ru.wikipedia.org [Электронный ресурс]: URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Усть-Луга_\(порт\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Усть-Луга_(порт)) (дата обращения 13.09.2024).
2. marine.org.ru [Электронный ресурс]: URL: <https://marine.org.ru/events/sudostroenie/16855/> (дата обращения 18.01.2025).
3. ru.wikipedia.org [Электронный ресурс]: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Лужская_губа (дата обращения 19.09.2024).
4. Мамаева М.А., Жигульский В.А., Царькова Н.С., Шилин М.Б. Экологическая стратегия развития морского портового комплекса в Лужской губе //Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2016. №6. С. 381-388. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-strategiya-razvitiya-morskogo-portovogo-kompleksa-v-luzhskoy-gube/viewer> (дата обращения 21.01.2025).
5. Тушонков В.Н., Зубрев Н.И., Козача В.М., Купалов-Ярополк К.О., Медянкина М.В., Мирошкина Л.А., Назырова Р.И., Павлов А.В., Парамонов С.Г., Шамшин А.А. ЗАКЛЮЧЕНИЕ экспертной комиссии государственной экологической экспертизы проектной документации «Универсальный торговый терминал «Усть-Луга». URL: https://www.rosmorport.ru/upload/medialibrary/831/conclusion_04_06_2020.pdf (дата обращения 08.12.2024).
6. da-fish.ru [Электронный ресурс]: URL: <https://da-fish.ru/ice.html> (дата обращения 14.10.2024).
7. www.meteo.nw.ru [Электронный ресурс]: URL: <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=391> <https://da-fish.ru/ice.html> (дата обращения 26.11.2024).
8. Гордеева С.М. Практикум по курсу Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации. / С.М. Гордеева. - СПб: РГГМУ, 2017.

9. Вайновский П.А., Титов Ю.Э. Методические рекомендации по статистико-вероятностному прогнозированию океанологических характеристик. - Мурманск, ПИНРО, 1989. - 93 с. (дата обращения 08.10.2024).

10. Вайновский П.А., Малинин В.Н. Методы обработки и анализа океанологической информации (одномерный анализ). - Л.: ЛГМИ, 1991. - 136 с. (дата обращения 18.09.2024).

11. Дэвис Дж. Статистический анализ данных в геологии. - М.: Мир, 1990. - 356с. (дата обращения 18.09.2024).

12. Аверкиев А.С., Булаева В.М., Густоев Д.В., Карпова И.П. Методические рекомендации по использованию метода сверхдолгосрочного прогнозирования гидрометеорологических элементов (МСПГЭ) и программного комплекса «Призма». - Мурманск, изд. ПИНРО, 1997.- 40 с. (дата обращения 19.09.2024).

13. Громов А.Ю. Применение цифровых фильтров Баттерворта в океанологии. Режимобразующие факторы, информационная база и методы ее анализа.- Л., Гидрометеиздат, 1989. - с.17-26. (дата обращения 18.09.2024).

14. Butterworth S. On the theory of filter amplifiers-Experimental wireless (and the wireless engineer), 1930. vol.7, N 85, pp. 536-541. (дата обращения 19.09.2024).

15. Руководящий документ РД 52.27.759-2011

