



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления
прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Абиотические факторы, влияющие на рыбопромысловый потенциал
Берингова моря»

Исполнитель: Богданова Маргарита Евгеньевна

Руководитель: к. г. н. Густоев Дмитрий Владимирович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«10» июня 2026г.

г. Санкт-Петербург

2026

Оглавление	
ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Описание района исследования.....	5
1.1 Физико-географическая характеристика Берингова моря.....	5
1.2 Климат.....	6
1.3 Гидрологический режим	7
1.4 Рыбопромысловый потенциал.....	11
Глава 2. Материалы и методы исследования.....	14
2.1 Описательная статистика	14
2.2 Корреляционный анализ	17
2.3 Спектральный анализ	17
2.4 Вейвлет анализ	18
2.5 Двумерная гистограмма	19
Глава 3. Результаты исследования.....	19
3.1 Межгодовая изменчивость абиотических факторов	19
3.2 Двумерная гистограмма и проверка соответствия нормальному закону.....	26
3.3 Оценка временной структуры данных методом спектрального анализа	31
3.4 Исследование временной изменчивости с помощью вейвлет-преобразования	37
3.5 Анализ взаимозависимостей с помощью корреляционной матрицы	42
3.6 Фильтрация рядов.....	46
3.7 Оценка возможности прогнозирования статистическими методами	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	53
Список литературы.....	54

ВВЕДЕНИЕ

Берингово море считается одним из наиболее продуктивных рыбопромысловых регионов не только России, но и в мире. Ввиду высокого географического положения это море считается достаточно холодным, благодаря чему промысел минтая в нем считается крупнейшим в мире. Для отечественной рыбохозяйственной отрасли это море имеет стратегическое значение, обеспечивая значительную долю ежегодного улова. Промысловый фонд Берингова моря представлен большим разнообразием видов, среди которых особое место занимают такие массовые объекты, как минтай, тихоокеанская треска и различные виды лососей. Также значительную роль в промысле играют камбаловые, сельдь и ряд донных рыб. Устойчивое использование этих ресурсов является основой для экономического благополучия прибрежных регионов Дальнего Востока и важной частью продовольственной безопасности страны.

Однако продуктивность моря и, как следствие, эффективность рыболовства не являются постоянными величинами. Они в значительной степени зависят от состояния окружающей среды и подвержены влиянию сложного комплекса абиотических факторов. К ним, прежде всего, относятся температурный режим воды, ледовитость, соленость, особенности течений, атмосферные процессы и явления, связанные с изменением климата. Эти физические условия определяют распределение кормовой базы, направление миграций промысловых скоплений, сроки нереста и выживаемость молоди. Например, аномально теплые или холодные сезоны могут кардинально менять районы и интенсивность лова, напрямую влияя на объемы добычи.

Таким образом, актуальность данной работы обусловлена необходимостью глубокого понимания взаимосвязей между изменяющимися абиотическими условиями Берингова моря и состоянием его промысловых ресурсов. В условиях наблюдаемых климатических сдвигов такая оценка становится критически важной для прогнозирования ситуации, адаптации

промысловой стратегии и разработки научно обоснованных мер управления.

Целью работы является оценка влияния основных абиотических факторов на условия и эффективность рыбного промысла в Беринговом море.

Задачи:

1. Дать характеристику основных абиотических факторов среды Берингова моря.

2. Проанализировать состояние и особенности рыболовства в данном регионе.

3. Исследовать механизмы и найти примеры влияния изменений абиотических условий на рыбный промысловую деятельность в Беринговом море.

Глава 1. Описание района исследования

1.1 Физико-географическая характеристика Берингова моря

Берингово море – самое северное из Дальневосточных морей России. Оно находится между двумя крупнейшими материками Азии и Америки и отделено от Тихого океана островами Командорско-Алеутской дуги. Оно имеет преимущественно естественные границы, но местами его пределы очерчиваются условными линиями. Берингово море занимает пространство между параллелями $66^{\circ}30'$ и $51^{\circ}22'$ с. ш. и меридианами $162^{\circ}20'$ в. д. и 157° з. д. Его общее очертание границ характеризуется сужением контура с юга на север (рис. 1).

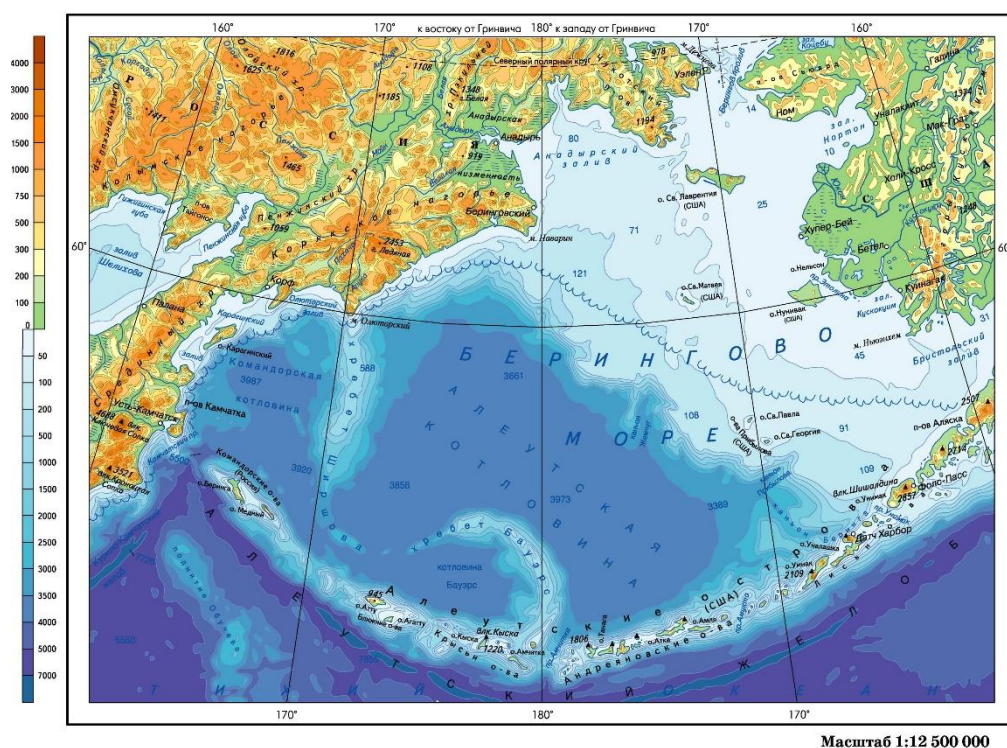


Рисунок 1. Физическая карта Берингова моря

Берингово море одно из самых глубоких морей на планете. По максимальной глубине оно занимает 11-е место в мире и является самым глубоким среди всех морей, омывающих берега России. Его площадь равна 2315 тыс. км², объем 3796 тыс. км³, средняя глубина 1640 м, наибольшая 4151 м. При столь больших средней и максимальной глубинах площадь с глубинами

менее 500 м занимает около половины всех пространств Берингова моря, поэтому оно относится к окраинным морям смешанного материково-океанического типа.

В Беринговом море, помимо крупных Командорских островов и Алеутской островной дуги, в западной части находится остров Карагинский, а в восточной острова: Святого Лаврентия, Святого Матвея, Нельсон, Нунивак, Святого Павла и Святого Георгия.

Береговая линия Берингова моря отличается сложностью и высокой степенью изрезанности, формируя многочисленные заливы, бухты, малые бухты, полуострова, мысы и проливы. Для экосистемы особое значение имеют проливы, соединяющие море с Тихим океаном. Суммарная площадь их поперечного сечения составляет приблизительно 730 км², при этом глубины в отдельных проливах достигают 1000–2000 метров, а в Камчатском проливе около 4000–4500 метров. Данные морфометрические характеристики обеспечивают водообмен не только в поверхностных, но и в глубинных горизонтах, что предопределяет существенное влияние Тихого океана на гидрологический режим Берингова моря. Площадь поперечного сечения Берингова пролива равна 3,4 км² при максимальной глубине всего 42 метра, вследствие чего воды Чукотского моря практически не оказывают воздействия на Берингово море. [4]

1.2 Климат

Для большей части акватории Берингова моря характерен субарктический тип климата. К северу от 64° с.ш., на ограниченной территории, климат арктический, а к югу от 55° с.ш. имеет умеренный морской. Формирование климата обусловлено воздействием воздушных масс Северного Ледовитого океана с севера, северной части Тихого океана с юга, прилегающих участков суши и барических центров действия атмосферы. В открытом море, удаленном от материков, климат морской, с незначительными амплитудами колебаний температуры воздуха, высокой облачностью,

частыми туманами и значительным количеством осадков.

В зимний сезон под влиянием Алеутского минимума преобладают ветры северо-западного, северного и северо-восточного направлений, которые приносят холодный морской арктический, а также холодный сухой континентальный воздух. Скорость ветра в прибрежных районах составляет 6–8 м/с, в открытом море до 12 м/с. В западной части моря нередко развиваются штормовые условия с ветрами от 30 до 40 м/с, продолжительностью до девяти суток. Средняя температура воздуха в январе–феврале варьирует от 0 до -4°C на юге и юго-западе и от -15 до -23°C на севере и северо-востоке. У берегов Аляски отмечены понижения температуры до -48°C . Средние многолетние типовые распределения температур показаны на рисунке 2.

В летний период возрастает влияние Гавайского антициклона; над Беринговым морем начинают преобладать ветры южных направлений со скоростью от 4 до 7 м/с. В южную часть моря в среднем один раз в месяц проникают тропические тайфуны, сопровождающиеся ветрами ураганной силы. Повторяемость штормов летом ниже, чем зимой. Температура воздуха в открытом море составляет от 4°C на севере до 13°C на юге; в прибрежных районах она заметно выше. Годовая сумма атмосферных осадков изменяется от 450 мм на северо-востоке до 1000 мм на юго-западе. [2]

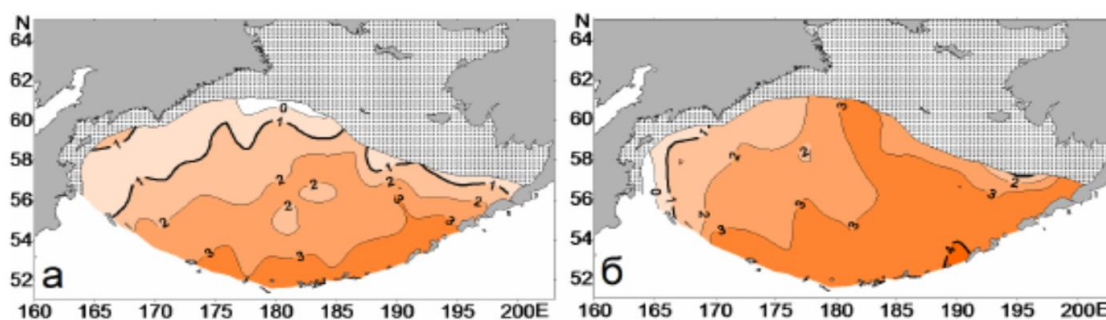


Рисунок 2. Средние многолетние типовые распределения температуры воды ВКС в феврале (а – «холодные», б – «теплые» годы). Заштрихованная акватория – льды. [5]

1.3 Гидрологический режим

Берингово море отличается ярко выраженной стратификацией вод.

Верхний слой толщиной до 150–200 метров представляет собой относительно опресненную и подверженную сезонным изменениям водную массу. Ее соленость снижается за счет таяния льдов, стока крупных рек (таких как Анадырь и Юкон) и значительного количества осадков. Летом этот слой прогревается, однако даже в августе температура редко превышает +10 °С. Ниже, на глубинах от 200 до 1000 метров, залегает промежуточная холодная вода с температурой около –1,7 °С. Еще глубже, через многочисленные проливы Алеутской гряды, проникает более теплая и соленая тихоокеанская вода, формирующая глубоководную водную массу.

Важнейшей особенностью гидрологического режима является мощная система течений, которая имеет характер круговорота, показанная на рисунке 3. Вдоль побережья Аляски на север устремляется теплое Аляскинское течение — ответвление Северо-Тихоокеанского течения. Оно приносит в южную часть моря относительно теплую воду. В противовес ему вдоль российского побережья Камчатки и Чукотки на юг движется холодное Камчатское течение, несущее воды из Арктики. Эта циркуляция играет ключевую роль в распределении тепла, льда и планктона. Зимой более половины площади моря, особенно его северная и западная части, покрывается дрейфующими льдами; максимальное распространение ледяного покрова достигается в марте. Летом льды отступают, но даже в августе они могут сохраняться в Беринговом проливе и заливе Анадырь. Сильные приливы, особенно в мелководных северных районах, где их величина может превышать 3 метра, активно перемешивают воду, влияя на ледовую обстановку и условия жизни организмов. [1]

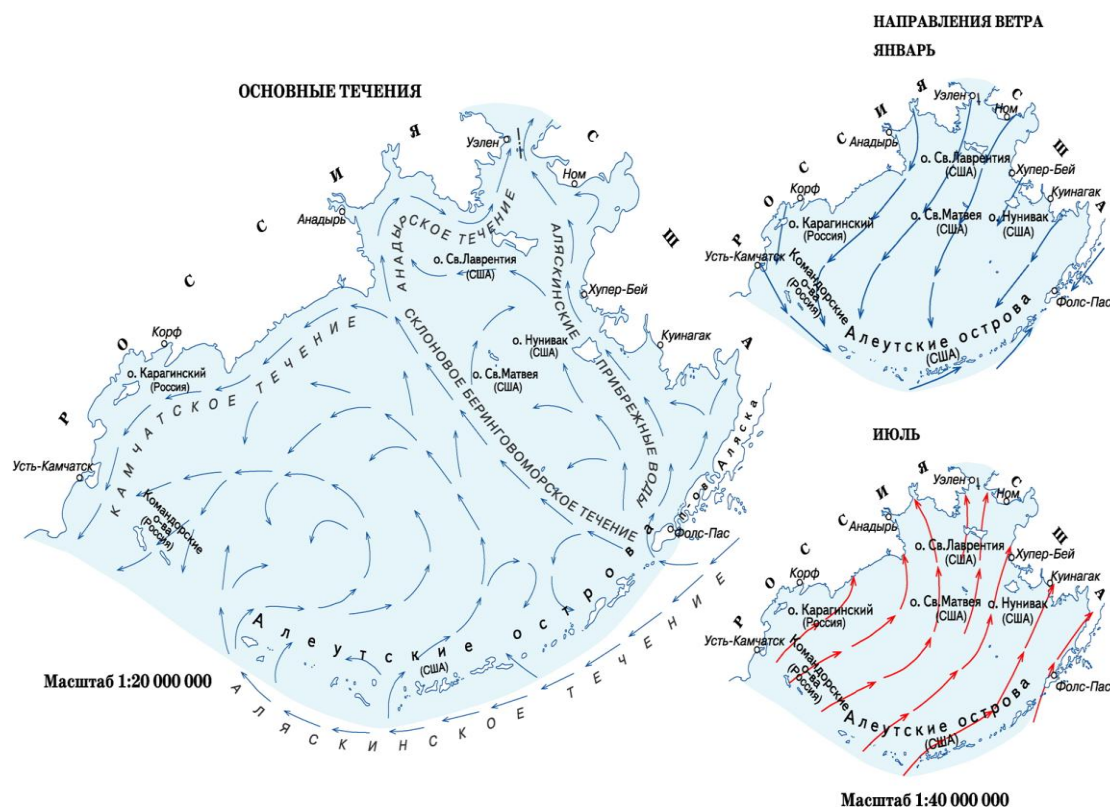


Рисунок 3. Основные течения и направления ветров

Соленость поверхностных вод Берингова моря изменяется от 33,0 до 33,5‰ на юге, до 31,0‰ на востоке и северо-востоке и до 28,6‰ в Беринговом проливе (рисунок 4). Наиболее существенное опреснение происходит весной и летом в районах впадения рек Анадырь, Юкон и Кускоквим. Однако направление основных течений вдоль побережий ограничивает влияние материкового стока на глубокие районы моря. Вертикальное распределение солености почти одинаково во все сезоны года. От поверхности до горизонтов 100–125 метров она равна от 33,2 до 33,3‰. Некоторое увеличение солености происходит от горизонтов от 125–150 метров до 200–250 метров. На глубинах от 250 метров и ниже соленость не изменяется.

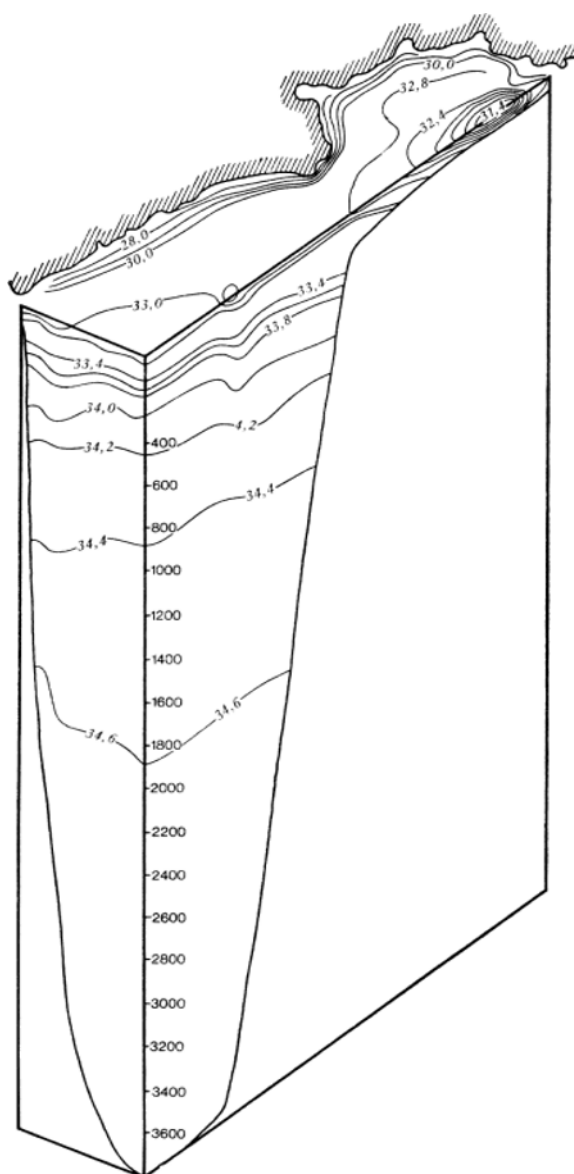


Рисунок 4. Распределение солёности на поверхности и по глубине в Беринговом море

Значительное выхолаживание вод, а в северных районах и интенсивное льдообразование, способствуют динамичному развитию осенне-зимней конвекции в море. В течение октября и ноября она захватывает поверхностный слой от 35 до 50 метров и продолжает проникать глубже; при этом происходит отдача тепла атмосфере морем. Температура всего захваченного конвекцией слоя в это время года понижается от 0,08 до 0,10°С в сутки. Далее, вследствие уменьшения разностей температуры воды и воздуха и увеличения толщины слоя конвекции, температура воды падает несколько медленнее. Так, в декабре и январе, когда в Беринговом море создается совершенно однородный

охлажденный (приблизительно до 2,5°C) поверхностный слой значительной толщины (от 120 до 180 метров), температура всего захваченного конвекцией слоя понижается в сутки от 0,04 до 0,06°C.

Граница проникновения зимней конвекции углубляется при приближении к берегам вследствие усиленного охлаждения вблизи материкового склона и отмели. В юго-западной части моря это понижение особенно велико. С этим связано наблюдающееся опускание холодных вод вдоль берегового склона. Вследствие низкой температуры воздуха, обусловленной высокой широтой северо-западного района, зимняя конвекция развивается здесь весьма интенсивно и, предположительно, уже в середине января в связи с мелководностью района достигает дна.

Основной массе вод Берингова моря свойственна субарктическая структура, главная особенность которой заключается в существовании холодного промежуточного слоя летом, а также расположенного под ним теплого промежуточного слоя. Только в самой южной части моря, в районах, непосредственно прилегающих к Алеутской гряде, обнаружены воды иной структуры, в которых оба промежуточных слоя отсутствуют. [4]

1.4 Рыбопромысловый потенциал

В промысловых масштабах в Беринговом море добывается ряд ценных видов рыб, один из которых дальневосточный минтай (*Gadus chalcogrammus*). Эта рыба является одной из наиболее важных промысловых объектов северной части Тихого океана и играет значительную роль в экономике российского рыбохозяйственного комплекса. По объемам добычи этот вид занимает лидирующие позиции среди тресковых рыб и относится к числу наиболее массовых объектов мирового рыболовства. Основные запасы минтая сосредоточены в дальневосточных морях России, что делает его важнейшим ресурсом для обеспечения продовольственной безопасности страны и развития экспортного потенциала рыбной отрасли.

Минтай относится к семейству тресковых и представляет собой

холодолобивую придонно-пелагическую рыбу. Для него характерно удлинненное тело, крупные глаза и пятнистая серовато-оливковая окраска (рисунок 5). Максимальная длина отдельных особей может достигать от 90 до 100 см, а масса – около 5 кг. Средняя продолжительность жизни составляет 15–16 лет. Половой зрелости рыба обычно достигает в возрасте трех–четырех лет, после чего начинает участвовать в нересте.

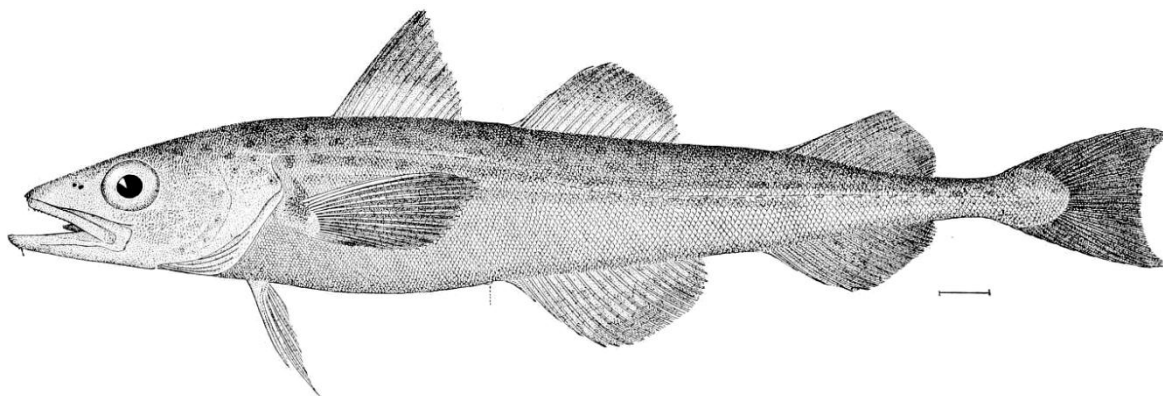


Рисунок 5. Дальневосточный минтай (*Gadus chalcogrammus*)

Ареал дальневосточного минтая охватывает северную часть Тихого океана (рисунок 6). У берегов России он широко распространен в Беринговом, Охотском и Японском морях. Значительные скопления также встречаются у побережья Аляски, в заливе Аляска и вдоль западного побережья Северной Америки. Наиболее крупные промысловые запасы сосредоточены именно в российских дальневосточных морях. Минтай предпочитает холодные воды с температурой от 2 до 9 °С и обычно обитает на глубинах от 200 до 300 м, однако способен совершать вертикальные миграции и встречаться на глубинах до 700 м и более. Благодаря высокой экологической пластичности этот вид успешно приспособился к различным условиям морской среды.



Рисунок 6. Естественный ареал [7]

Образ жизни минтая тесно связан с сезонными миграциями. В течение года рыба перемещается между районами нагула и нереста, образуя многочисленные плотные косяки. Нерест происходит в разные сроки в зависимости от региона. В Беринговом море он наблюдается преимущественно весной и летом, у берегов Кореи – зимой и весной, а у побережья полуострова Камчатка – весной. Во время размножения рыба подходит ближе к берегу и может встречаться на глубинах 50–100 м. Самки отличаются высокой плодовитостью и способны выметывать миллионы икринок, что способствует быстрому воспроизводству популяции.

Минтай является важным звеном морских пищевых цепей. Молодь питается главным образом планктонными организмами и мелкими ракообразными. По мере роста в рационе увеличивается доля более крупной добычи, включая криль, рыбу и кальмаров. Взрослые особи занимают положение активных хищников и оказывают заметное влияние на структуру морских экосистем. Исследования российских ученых подтверждают важную роль зоопланктона и ракообразных в питании минтая, особенно в районах Берингова моря.

Особое значение дальневосточный минтай имеет как объект промышленного рыболовства. Его добыча ведется преимущественно траловым способом. Благодаря многочисленности популяций и высокой продуктивности вид остается основой российского океанического промысла. По данным отраслевых источников, ежегодный вылов минтая в России составляет более полутора миллионов тонн, а его доля в общем объеме отечественного вылова водных биоресурсов превышает треть. Значительная

часть продукции поставляется на экспорт в виде мороженой рыбы, филе, икры и сурими – сырья для производства имитации крабового мяса.

Таким образом, дальневосточный минтай представляет собой уникальный биологический ресурс северной части Тихого океана. Основу общего вылова составляют минтай, треска, дальневосточные лососи и сельдь, а также широкий спектр донных видов рыб: камбала, палтус, терпуг и морские окуни. Помимо рыболовства, значительный вклад вносят беспозвоночные, включая крабов, креветок, кальмаров и морских ежей.

Глава 2. Материалы и методы исследования

В основе проведенной исследовательской работы лежит анализ комплекса гидрометеорологических параметров, определяющих условия формирования рыбопромыслового потенциала Берингова моря. Для достижения поставленной цели были привлечены данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также данные глобальных реанализов и климатических баз данных. Временные периоды для каждого параметра выбирались индивидуально, исходя из доступности и максимальной продолжительности непрерывных рядов наблюдений. В данной работе использовались дополнительные программы (специализированные статистические пакеты) Past5 и Prisma.

2.1 Описательная статистика

Первым этапом анализа стал расчет описательной статистики для каждого из рассматриваемых параметров — температуры поверхности моря, солёности, плотности, атмосферного давления, ледовитости и концентрации хлорофилла-а. Для каждого временного ряда вычислялись среднее арифметическое, стандартная ошибка, медиана, мода, стандартное отклонение, дисперсия, эксцесс (характеризующий крутость распределения) и асимметрия. Дисперсия и стандартное отклонение рассчитывались встроенными функциями пакета анализа данных Excel (аналог формул

=ДИСП.В() и =СТАНДОТКЛОН.В()) и использовались для количественной оценки изменчивости абиотических условий: чем выше дисперсия параметра, тем менее стабильна среда обитания промысловых видов, что позволяет выделять зоны риска и прогнозировать возможные смещения скоплений рыбы.

Среднее арифметическое характеризует центр тяжести исследуемой характеристики или точку ее равновесия при различных колебаниях. Формула имеет вид:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

где N – длина статистического ряда

Медианой называют значение признака, которое находится в середине ряда, упорядоченного по возрастанию. Ее ключевое свойство: сумма абсолютных отклонений всех элементов ряда от медианы минимальна.

$$\sum_{i=1}^N |x_i - Me| = \min$$

Для коротких статистических рядов (N<30) медиану используют вместо среднего арифметического значения.

Мода представляет собой значение, которое наиболее часто встречается в ряду данных, и определяется как локальные максимумы эмпирической функции распределения. В зависимости от количества таких вершин распределение может быть одномодальным, двумодальным или многомодальным. Моды отражают квазистационарные, то есть наиболее устойчивые, состояния изучаемой характеристики.

Стандартным отклонением или средним квадратическим отклонением называется показатель рассеивания значений случайной величины относительно ее математического ожидания. Имеет вид квадратного корня из дисперсии и высчитывается по формуле:

$$\sigma = \sqrt{D}$$

Дисперсия измеряет разброс значений в наборе данных относительно их среднего значения и характеризует степень вариативности данных и показывает, насколько сильно значения отклоняются от среднего. Чем больше дисперсия, тем больше разброс данных и выше неоднородность информации. Если значения близки к среднему, дисперсия низкая, если сильно различаются, то высокая. Формула расчета:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

Эксцесс – это мера так называемой «крутизны» или «остроконечности» распределения данных по сравнению с нормальным распределением.

$$Ex = \left[\frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4 \right] - 3$$

Если $Ex > 0$ то ЭФР (Эмпирическая функция распределения) является островершинной и, как правило, у нее наблюдается два равнозначных хвоста. Если $Ex < 0$, то ЭФР является плоско вершинной и распределение стремится к случайному. Эксцесс бывает слабо выраженный ($|Ex|$ от 0 до 0,25), умеренный ($|Ex|$ от 0,25 до 0,50) и сильно выраженный ($|Ex| > 0,50$). Значительные значения эксцесса ($|Ex| > 1,0$) свидетельствуют о наличии в ряду «выбросов», которые могут отражать ошибки наблюдения или наблюдаемые катастрофические эффекты

Асимметрия характеризует симметричность ЭФР относительно среднего значения и рассчитывается по формуле:

$$As = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3$$

При полной симметрии ЭФР относительно среднего значения $As = 0$. Если

$As > 0$ то ЭФР обладает положительным «хвостом» и основная масса наблюдений (а также медиана) меньше среднего значения. Если $As < 0$ то ЭФР обладает отрицательным «хвостом» и основная масса наблюдений (а также медиана) больше среднего значения. Может быть слабая ($|As|$ от 0 до 0,25),

умеренная ($|As|$ от 0,25 до 0,50) и сильная ($|As| > 0.50$). Значительные значения асимметрии ($As > 1.0$) свидетельствуют о наличии в ряду «выбросов», которые могут отражать ошибки наблюдения или наблюдаемые катастрофические эффекты.

2.2 Корреляционный анализ

Корреляционный анализ представляет собой статистический метод, который позволяет определить степень связи между несколькими случайными переменными, описывающими некоторую область. А автокорреляция измеряет насколько текущее значение ряда связано с его предыдущими значениями.

Между двумя переменными может существовать взаимосвязь. Она может быть функциональной и стохастической (вероятностной). Для оценки тесноты и направления связи между изучаемыми переменными пользуются показателем корреляции. Коэффициент корреляции R характеризует степень тесноты линейной зависимости. Линейная зависимость двух случайных величин заключается в том, что при возрастании одной величины другая имеет тенденцию возрастать (или убывать) по линейному закону.

Если необходимо рассчитать коэффициенты корреляции для нескольких переменных (больше двух) во всех сочетаниях друг с другом, то набор получившихся коэффициентов корреляции можно записать в виде матрицы, которая называется корреляционной.

2.3 Спектральный анализ

Если возникает задача выявить в исследуемом процессе циклические составляющие, можно воспользоваться спектральным или гармоническим анализом. В основе гармонического анализа лежит идея, что любой ряд можно разложить без остатка в ряд Фурье, т.е. на конечное число гармоник. Гармониками называются тригонометрические функции, имеющие периоды, кратные длине ряда, т.е. каждая гармоника целое число раз «укладывается» в длину исходного ряда. Формула гармоник:

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

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

2.4 Вейвлет анализ

Для исследования многолетней и межгодовой изменчивости абиотических факторов, влияющих на рыбопромысловый потенциал Берингова моря, использовался непрерывный вейвлет-анализ (Continuous Wavelet Transform, CWT). Метод позволяет выявлять периодические компоненты различной продолжительности и оценивать их изменение во времени, что делает его эффективным инструментом анализа нестационарных океанографических процессов. На рисунке 7 представлен пример локального спектра мощности, полученного методом непрерывного вейвлет-преобразования. По оси абсцисс представлено время, по оси ординат – период колебаний. Цветовая шкала отражает величину спектральной мощности сигнала. Жирным контуром выделены области статистически значимых колебаний, а заштрихованные области соответствуют конусу влияния, в пределах которого результаты могут быть искажены краевыми эффектами.

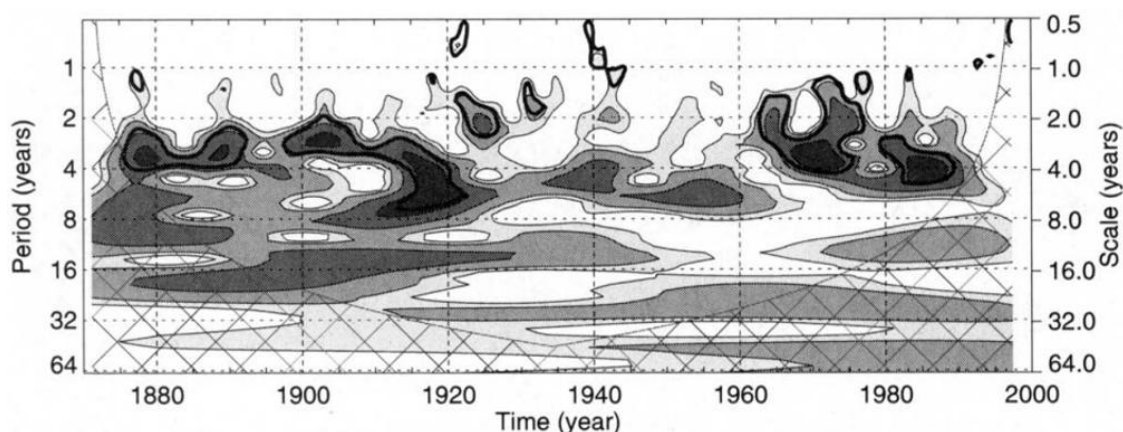


Рисунок 7. Пример локального вейвлетного спектра мощности временного ряда (по Torrence & Compo, 1998).

Объектами анализа в данной работе являлись временные ряды

температуры поверхности моря, давления в центре Арктического антициклона и ледовитости, полученные для исследуемой акватории Берингова моря. Пространственная привязка данных определялась координатами (широтой и долготой) соответствующих ячеек сетки наблюдений.

2.5 Двумерная гистограмма

Для визуальной оценки распределения данных строились гистограммы частот, отображающие повторяемость значений исследуемых параметров. На гистограммы накладывалась теоретическая кривая нормального распределения, рассчитанная по выборочным значениям среднего арифметического и стандартного отклонения. Сравнение эмпирического распределения с теоретической кривой позволяло оценить степень близости данных к нормальному распределению, а также выявить возможную асимметрию, наличие выбросов и отклонения в хвостах распределения. При нормальном распределении большинство наблюдений концентрируется вблизи среднего значения, а частота встречаемости значений уменьшается по мере удаления от центра распределения. Визуальное сопоставление гистограммы распределения и теоретической кривой нормального закона использовалось для предварительной оценки пригодности данных к дальнейшему статистическому анализу и выявления особенностей распределения абиотических факторов, характеризующих состояние экосистемы Берингова моря.

Глава 3. Результаты исследования

3.1 Межгодовая изменчивость абиотических факторов

Для прогнозирования движения промысловых видов рыб в Беринговом море, необходим комплексный подход и достаточно полные климатические данные. В данной работе в качестве основных использованы данные по

температуре, давлению, широте и долготе (для отслеживания динамики Арктического антициклона), а также показатели ледовитости и концентрации хлорофилла-а.

Был рассмотрен ряд данных по температуре за период с 1949 года по 2025 год по западной части Берингова моря, показанный на рисунке 8. Временной ряд температуры поверхности океана демонстрирует четкую положительную тенденцию. В период с 1949 по 1976 г. значения колебались в основном между 3,9 и 4,7 °С, с отдельными пиками (1959 г. – 4,37°С и 1963 г. – 4,64°С) и минимумами (1955 г. – 3,66°С, 1976 г. – 3,72°С). С середины 1990-х годов температура устойчиво росла и после 1996 года (5,32°С) редко опускалась ниже 4,9°С, а в 2018 году достигала максимума 5,98°С. С 2022 по 2025 г. держалась на уровне 5,6–5,8°С. Межгодовая изменчивость в первой половине ряда умеренная (размах 1,0), во второй половине увеличивалась (размах 1,3), и особенно заметны резкие скачки, например, подъем с 4,37°С в 1998 г. до 5,23°С в 2003 г. Среднеквадратическое отклонение составляет 0,51°С на нижней границе 4,12°С и 5,15°С на верхней. Многие годы выходят за пределы СКО (обозначенные на рисунке 8 «сигма±») в обе стороны, особенно в последние два десятилетия, начиная с 2014 года. Линейный и нелинейный тренды имеют положительную тенденцию, свидетельствующую о потеплении, но нелинейный тренд показывает, что эта скорость не постоянна.

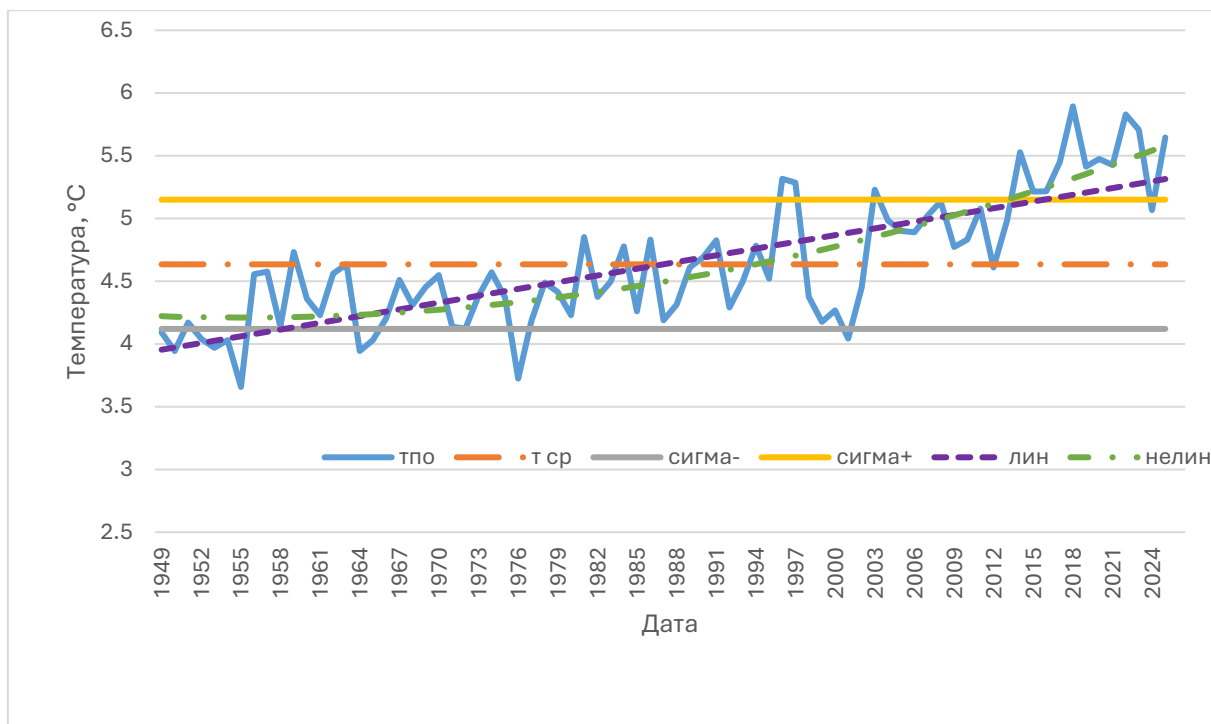


Рисунок 8. График межгодовой изменчивости температуры поверхности Берингова моря с 1949 по 2025 гг

Ряд давления центра Арктического антициклона, показанный на рисунке 9 колебался в диапазоне от 1012,2 гПа (1989 г.) и 1021,3 (1960 г.). Долговременный тренд не выявлен, период повышенного давления (примерно с 1957 г. по 1961 г. и середина 2000-х годов) чередуются с пониженным (с конца 1980-х по начало 1990-х годов, 2011 г., 2017–2021 г.). Межгодовая изменчивость относительно невелика: большинство значений лежит в пределах 1015,74–1019,44 гПа. Фиксируются редкие исключения со значениями давления ниже 1013 гПа или выше 1020 гПа. Среднее составило 1017,6 гПа, а СКО – 1,85 гПа на верхней границе 1019,44 гПа и на нижней 1015,74 гПа. Таким образом, изменчивость давления носит характер случайных колебаний без нарастающей амплитуды. Тренд имеет отрицательную тенденцию.

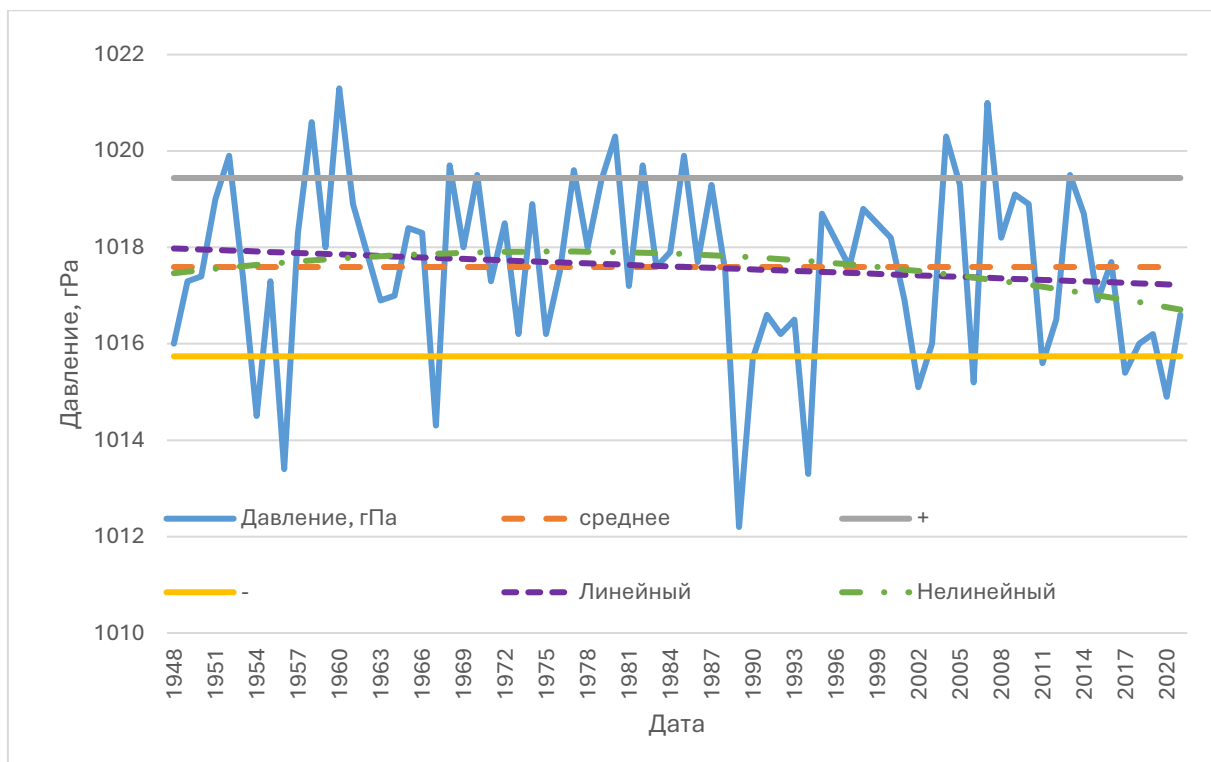


Рисунок 9. График межгодовой изменчивости давления центра Арктического антициклона с 1948 по 2021 гг

Рассматривался ряд данных широты центра Арктического антициклона, график межгодовой изменчивости отображен на рисунке 10. Основные повторяющиеся значения – 75° , $77,5^{\circ}$, 80° . Реже фиксируются $72,5^{\circ}$ (1976 г.), $82,5^{\circ}$ (1951 г. и 1999 г.), а также единственный выброс 85° в 1954 году (максимальное значение). В остальные годы широта стабильна и чаще всего имеет значение $77,5^{\circ}$ или 80° . Межгодовая изменчивость низкая преимущественно, годы лежат в пределах от 75° до 80° , а среднее составляет $77,33^{\circ}$. СКО имеет значение $1,85^{\circ}$. Исследуемый ряд представляется квазистационарным, т.к. фоновое положение почти не меняется, лишь изредка происходит кратковременные смещения. Тренд имеет отрицательную тенденцию.

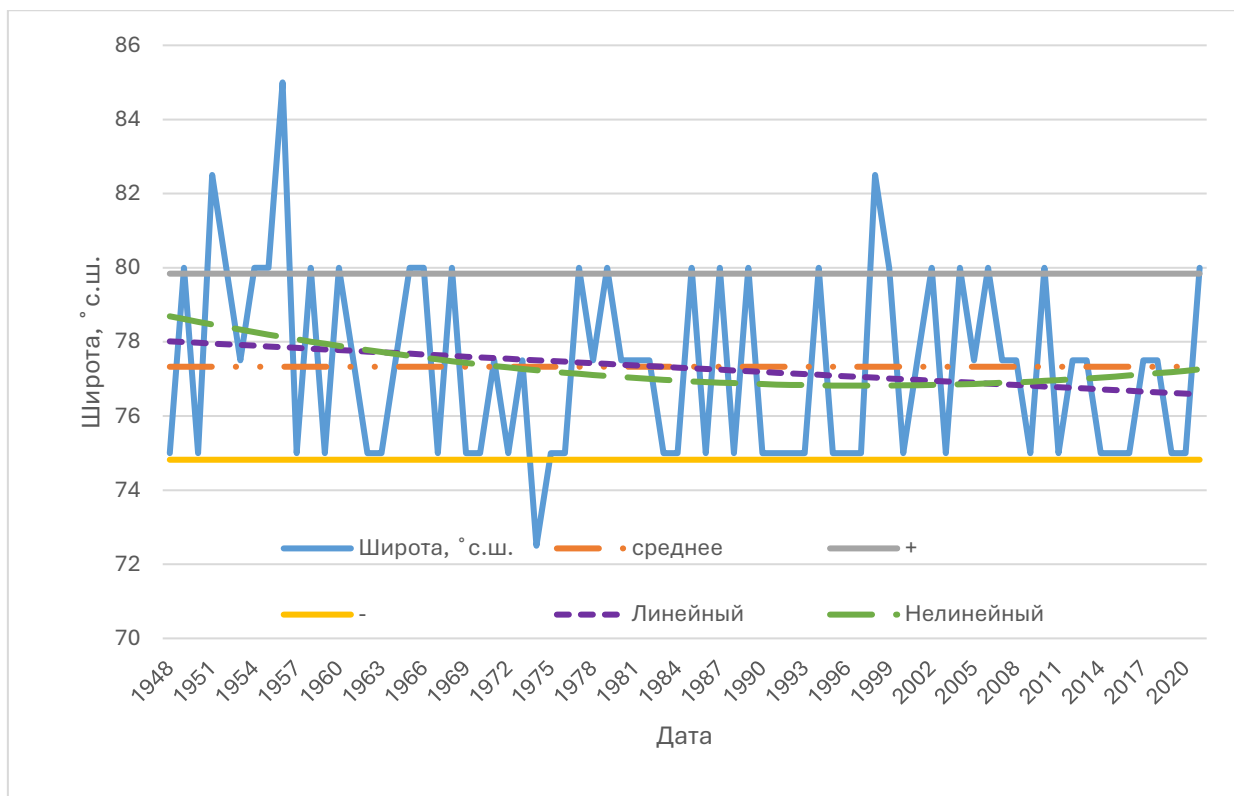


Рисунок 10. График межгодовой изменчивости широты центра Арктического антициклона с 1948 по 2021 гг

Рисунок 11 демонстрирует межгодовую изменчивость значений долготы центра Арктического антициклона. Значения варьируются от 165° до 280° . Нет тренда, нет устойчивой периодичности. Часто встречаются промежуточные значения от 190 до 220° . Размах превышает 100° , и переход от минимальных к максимальным значениям может происходить за один год. Относительно среднего (206.4°) СКО составляет 24.5° , и основная масса лет выходят за пределы стандартного отклонения. Это указывает на хаотическую, сильно изменчивую систему. Линейный тренд равен среднему значению, но нелинейный тренд показывает, что изменения есть.

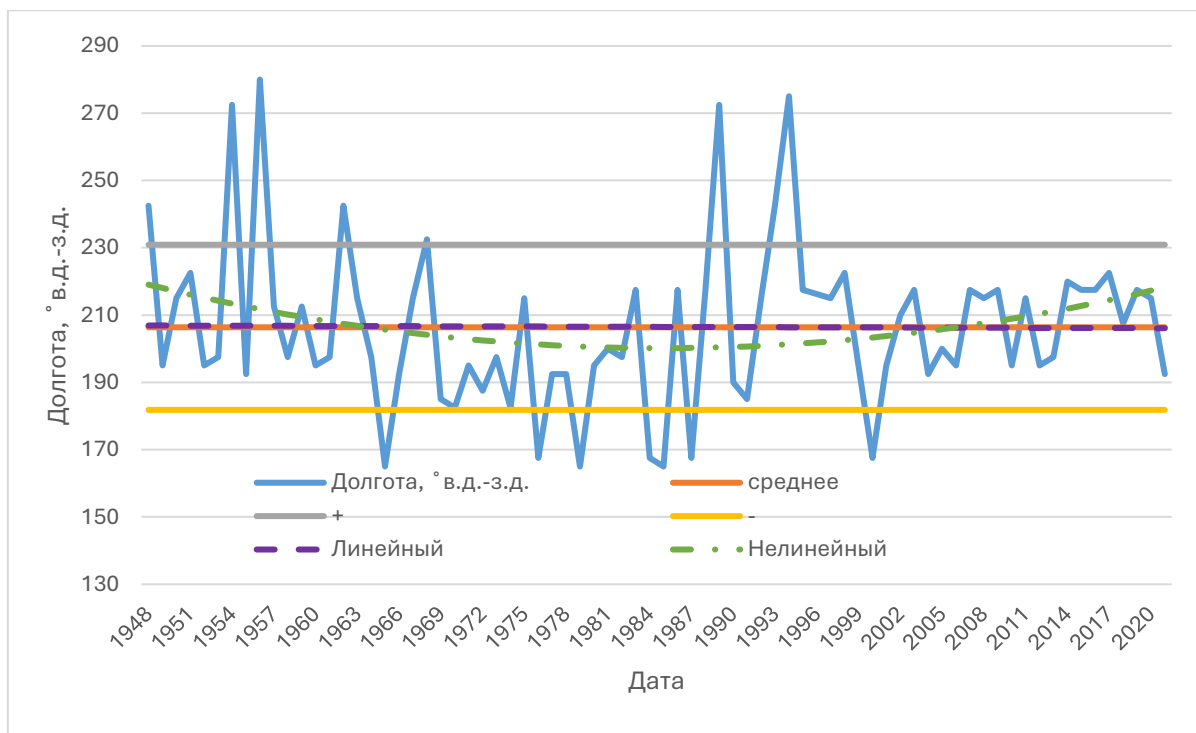


Рисунок 11. График межгодовой изменчивости долготы центра Арктического антициклона с 1948 по 2021 гг

На рисунке 12 отображен построенный ряд изменчивости ледовитости. Сначала от 80-х до 90-х годов значения колеблются в диапазоне 0,33–0,39 миллионов км² (далее мл км²), с отдельными пиками (1999 г. – 0,4275 мл км², 2012 г. – 0,4708 мл км²). Начиная с середины 2000-х заметно сокращение площади льдов, так после 2012 года значения падают до 0,25–0,20 мл км², а минимум 0,1275 мл км² зафиксирован в 2018 году. В годы с 2020 по 2025 ледовитость держится на уровне 0,25–0,30 мл км², что значительно ниже среднего за весь период, которое равно 0,33 мл км². Межгодовая изменчивость высокая, максимальная амплитуда достигает 0,34 мл км² (от 0,13 до 0,47 мл км²). После 2014 года все значения лежат ниже среднего по ряду, которое составляет 0,33 мл км². Таким образом, ледовитость обладает выраженным отрицательным трендом с крупными колебаниями. Тренд имеет отрицательную тенденцию.

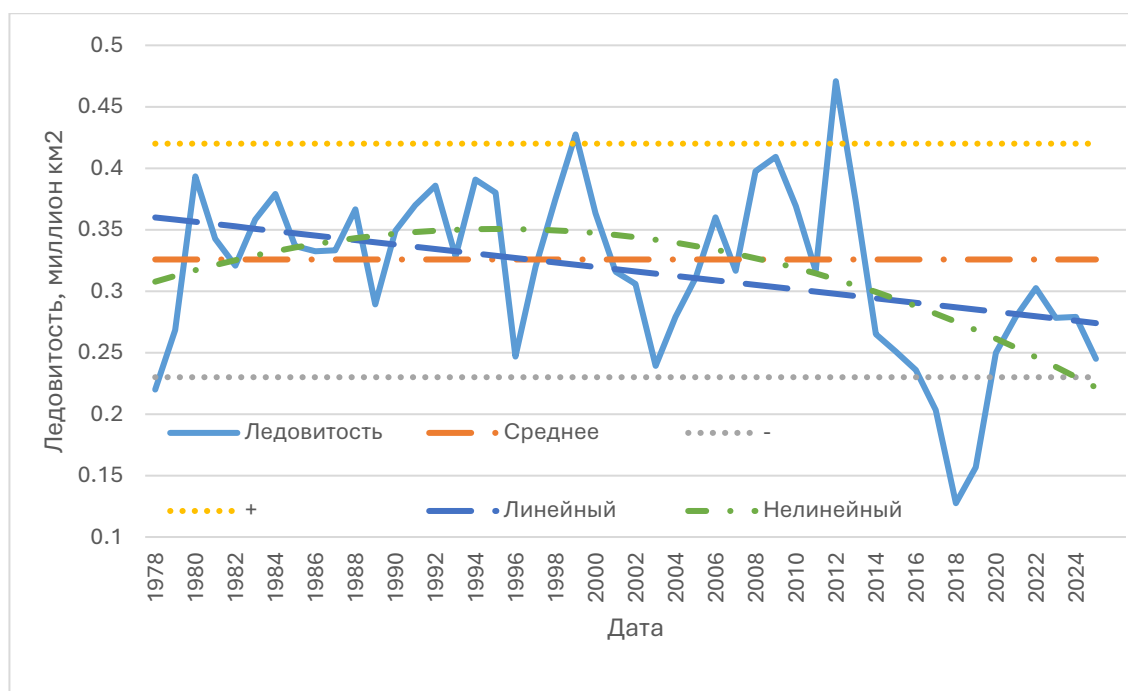


Рисунок 12. График межгодовой изменчивости ледовитости Берингова моря с 1978 по 2025 гг

Общая картина, отраженная на рисунках 8–12 показала, что при сопоставлении всех пяти рядов наиболее заметное сходство обнаруживается между температурой и ледовитостью. Их многолетняя динамика зеркально противоположна: по мере роста температуры после 1990-х годов ледовитость устойчиво снижалась. Оба ряда имеют четкий тренд (температура повышается, ледовитость падает), причем ускорение процессов происходило за последние 20–25 лет. Это говорит о том, что коэффициент корреляции между ними должен быть высоким и отрицательным, данное высказывание было подтверждено позже. Эта связь имеет физическое объяснение, солнце нагревает подстилающую поверхность и повышает температуру воздуха и воды, что напрямую приводит к таянию льдов.

Ряд давления не имеет схожести с рядами температуры и ледовитости, так как отсутствует линия тренда, колебания случайны и относительно невелики. Широта стабильна и не реагирует на изменения температуры, почти всегда постоянна, за исключением редких выбросов. Долгота выделяется хаотичностью и отсутствием какого-либо тренда, что резко контрастирует с плавным изменением температуры и ледовитости.

3.2 Двумерная гистограмма и проверка соответствия нормальному закону

Для наглядной оценки соответствия эмпирического распределения нормальному закону удобно рассмотреть на одном графике двумерную гистограмму и теоретическую кривую Гаусса. Это позволяет визуально сравнить форму фактического распределения с идеальным колоколообразным профилем, обнаружить асимметрию и моду, плоско вершинность или наличие выбросов. По всем параметрам были построены графики, перейдем к ним.

Был рассмотрен рисунок 13, на котором показана одномодальная гистограмма, распределение напоминает нормальный закон, но не является симметричным, правый склон более пологий. Мода имеет наибольшую повторяемость температуры в диапазоне от 4.1 до 4.55°C, которая зафиксирована 29 раз. Асимметрия положительная. Это отражает наличие в ряде нескольких аномально теплых лет, которые по большей части расположены в последних двух десятилетиях, что коррелируется с наблюдаемым потеплением.

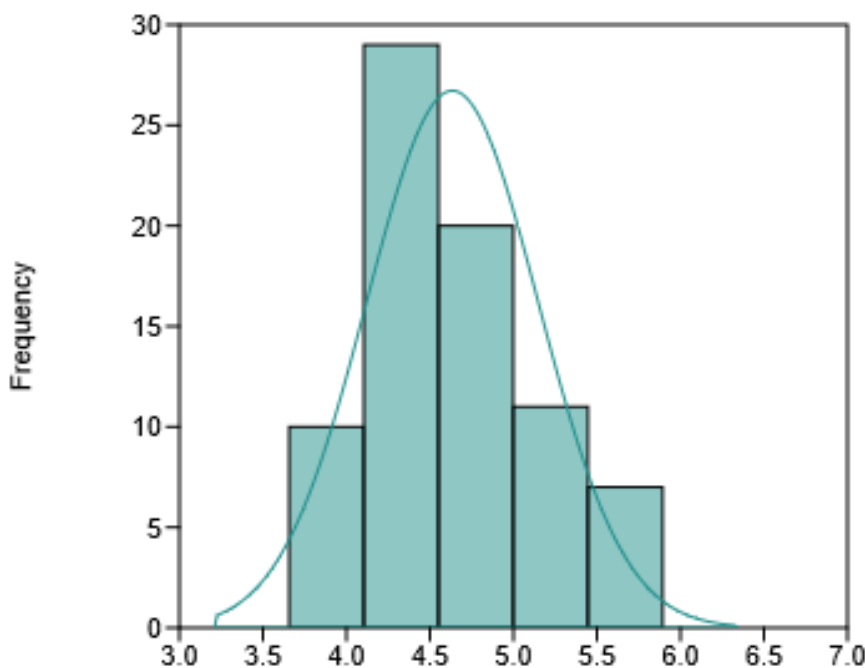


Рисунок 13. Двумерная гистограмма и распределение нормального

закона по среднегодовым данным по температуре поверхности Берингова моря

Рассмотрена гистограмма распределения среднегодовых значений давления в центре Арктического антициклона (рис. 14). Наблюдалась одномодальная форма гистограммы, которая довольно близка к нормальному закону, однако имеется небольшая отрицательная асимметрия, т.к. левый склон чуть более пологий. Наибольшая повторяемость (мода) приходится на диапазон 1018–1020 гПа, где зафиксировано 23 года. В целом распределение симметрично относительно среднего значения около 1017,5 гПа, с постепенным спадом частот в стороны низких и высоких значений. Такая форма распределения подтверждает, что межгодовая изменчивость давления носит случайный характер и не имеет тренда, а большая часть лет (около 70%) укладывается в интервал 1016–1021 гПа.

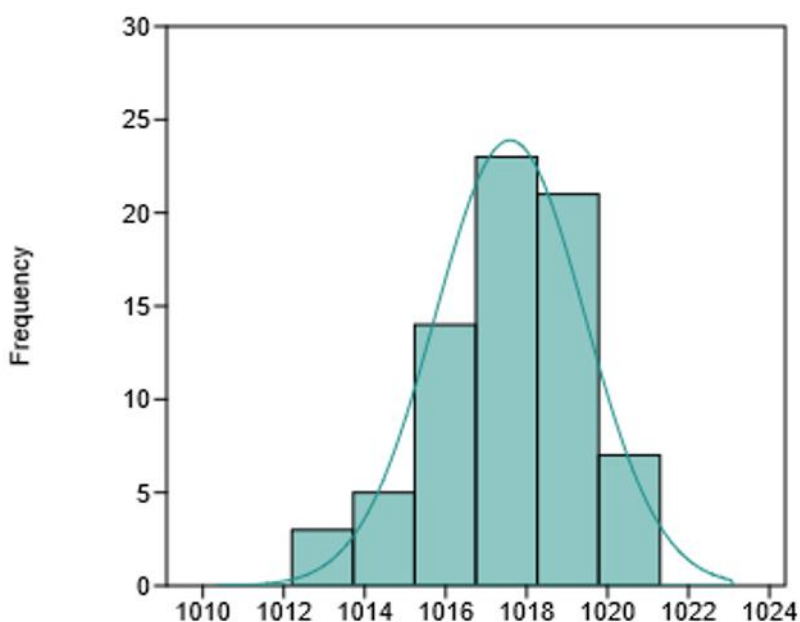


Рисунок 14. Двумерная гистограмма и распределение нормального закона по среднегодовым данным по давлению в центре Арктического антициклона

Была рассмотрена гистограмма на рисунке 15, которая показывает повторяемость широты центра арктического антициклона. Выявлена двумодальная форма распределения, что указывает на отсутствие

нормального распределения. Наибольшая повторяемость (мода) приходится на диапазон $74,6 - 76,6^\circ$ с.ш., где был зафиксирован 31 случай. Также выделяется вторая мода с диапазоном $78,8 - 80,8^\circ$ с.ш. Распределение асимметрично с небольшим смещением в сторону более низких широт, при этом высокие широты представлены лишь единичными наблюдениями. Такая форма гистограммы говорит о том, что центр антициклона чаще всего располагается в интервале $74 - 80^\circ$ с.ш., но его положение подвержено значительным межгодовым колебаниям без устойчивого тренда, что согласуется с хаотической изменчивостью.

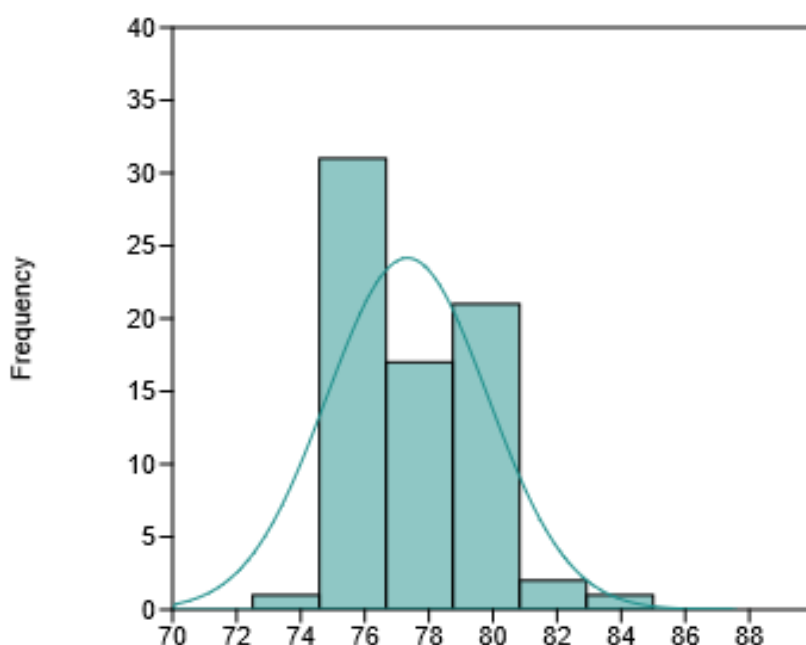


Рисунок 15. Двумерная гистограмма и распределение нормального закона по среднегодовым данным по широте центра Арктического антициклона

Был исследован рисунок 16, на котором расположены гистограмма и распределение нормального закона по среднегодовым данным по долготе. На рисунке наблюдается многомодальная форма распределения с резкими выраженными пиками, где сосредоточена подавляющая часть наблюдений. 29 случаев в моде с диапазоном $181,4 - 197,8$ и 23 случая в диапазоне $214,3 - 230,8$. Левый хвост заметно длиннее правого, а диапазоны $300-350^\circ$ и $350-400^\circ$

не содержат ни одного значения. Такая асимметрия (отрицательная, с вытянутым левым хвостом) свидетельствует о том, что центр антициклона преимущественно располагается в секторе $180\text{--}250^\circ$, тогда как смещения к западу (менее 200°) встречаются чаще, чем к востоку (более 250°). Распределение далеко от нормального из-за резкой концентрации данных в узком интервале и отсутствия симметрии. Это подтверждает выводы о высокой, но не хаотической изменчивости долготы: несмотря на отдельные выбросы, существует предпочтительная зона локализации антициклона

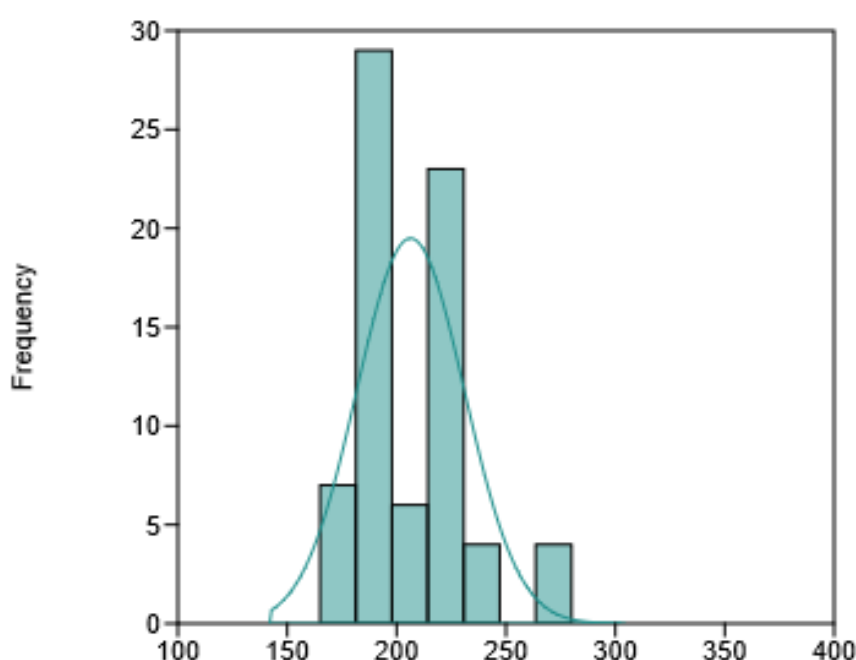


Рисунок 16. Двумерная гистограмма и распределение нормального закона по среднегодовым данным по долготе центра Арктического антициклона

Был проанализирован рисунок 17 отображающий распределение ледовитости по среднегодовым данным. Мы видим одномодальную форму с пиком в интервале $0,3335\text{--}0,4022$ (17 лет) и вторым по величине $0,2648\text{--}0,3335$ (15 лет). Левый хвост (ниже $0,2648$) длиннее правого (выше $0,4022$): это отражает тренд сокращения льдов в последние десятилетия. Распределение асимметрично (отрицательная асимметрия) и не соответствует нормальному закону из-за смещения моды и неравенства хвостов.

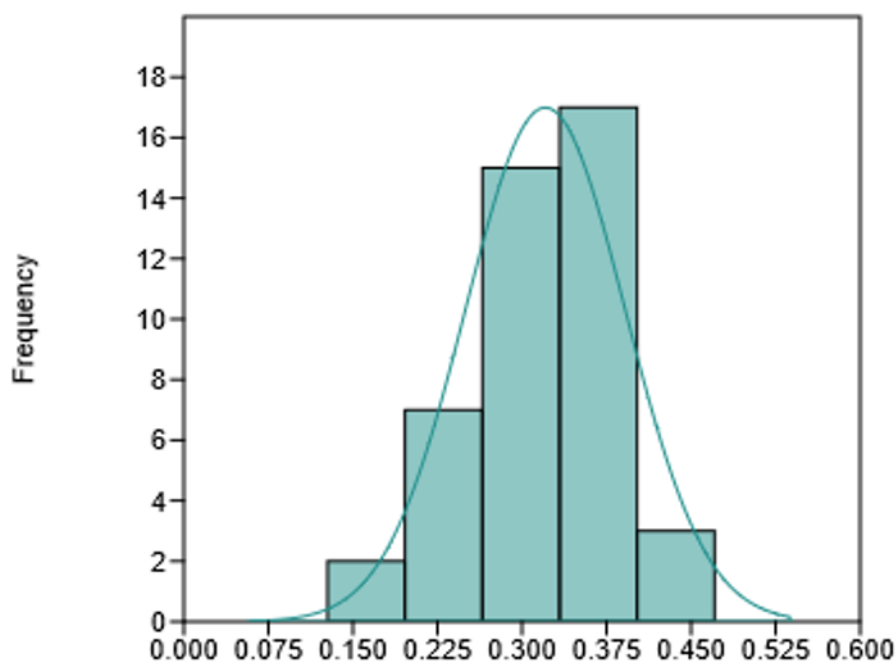


Рисунок 17. Двумерная гистограмма и распределение нормального закона по среднегодовым данным по ледовитости Берингова моря

Анализ рисунков 13–17 показал, что из пяти абиотических параметров наиболее близкое к нормальному распределению демонстрирует давление в центре Арктического антициклона, что подтверждает случайный характер его межгодовых колебаний без направленного тренда. Схожую структуру распределения имеют температура и ледовитость, так как обе характеристики являются одномодальными и асимметричными (положительная у температуры и отрицательная у ледовитости), что отражает наличие долговременных климатических тенденций (потепление и сокращение ледового покрова в последние десятилетия). Широта центра антициклона имеет двумодальное распределение с пиками 75 и 80° с.ш., указывая на отсутствие устойчивого тренда, но наличие двух квазистационарных состояний. Долгота характеризуется многомодальным распределением с выраженной зоной и с преимущественными смещениями в западном направлении.

3.3 Оценка временной структуры данных методом спектрального анализа

Для количественной оценки вклада различных временных масштабов в изменчивость гидрометеорологических параметров Берингова моря применяется спектральный анализ, позволяющий выделить статистически значимые квазипериоды по локальным максимумам. Графики были построены с помощью программного комплекса «ПРИЗМА».

По результатам спектрального анализа температуры поверхности Берингова моря (1949–2025 гг.), выделены статистически значимые квазипериоды, отражающие влияние глобальных климатических процессов (рисунок 18). Наибольшей спектральной плотностью (1,8566) обладает период 10000 лет, связанный с тектоническими и орбитальными вариациями, выходящими за рамки межгодового анализа. В диапазоне от 2 до 70 лет обнаружены локальные максимумы, соответствующие известным природным циклам. Период около 70 лет (1,6531) и его гармоника 35 лет (0,6215) совпадают с мультидекадной компонентой Тихоокеанской декадной осцилляции (Pacific Decadal Oscillation, PDO). Положительная фаза Тихоокеанской декадной осцилляции усиливает Алеутский минимум и вызывает потепление вод у побережья Аляски, что напрямую модулирует термический режим моря. Пики 23,3 года (0,2503) и 11,7 года (0,1738) близки к циклам солнечной активности: 22-летнему циклу Хейла (смена полярности магнитного поля) и 11-летнему циклу Швабе–Вольфа. Через арктическую осцилляцию и изменения общей циркуляции атмосферы солнечная активность влияет на температуру воды в высоких широтах. Пики 17,5 и 14 лет (0,1389 и 0,1825) также связаны с Тихоокеанской декадной осцилляцией, Арктической осцилляцией и северотихоокеанским паттерном. Широкий спектр пиков в диапазоне 2–8 лет (максимумы на 5,83; 5,38; 3,68; 2,8 лет и др.) полностью соответствует временной изменчивости явления Эль-Ниньо. Механизм связи – атмосферная телеконнекция: во время Эль-Ниньо Алеутский минимум

смещается на восток и углубляется, изменяя направление ветров, что приводит к потеплению в Беринговом море. Обратное влияние (смена фаз явления Эль-Ниньо) может синхронизироваться с окончанием солнечных циклов, объясняя взаимодействие 11/22-летних и 2–7-летних ритмов.

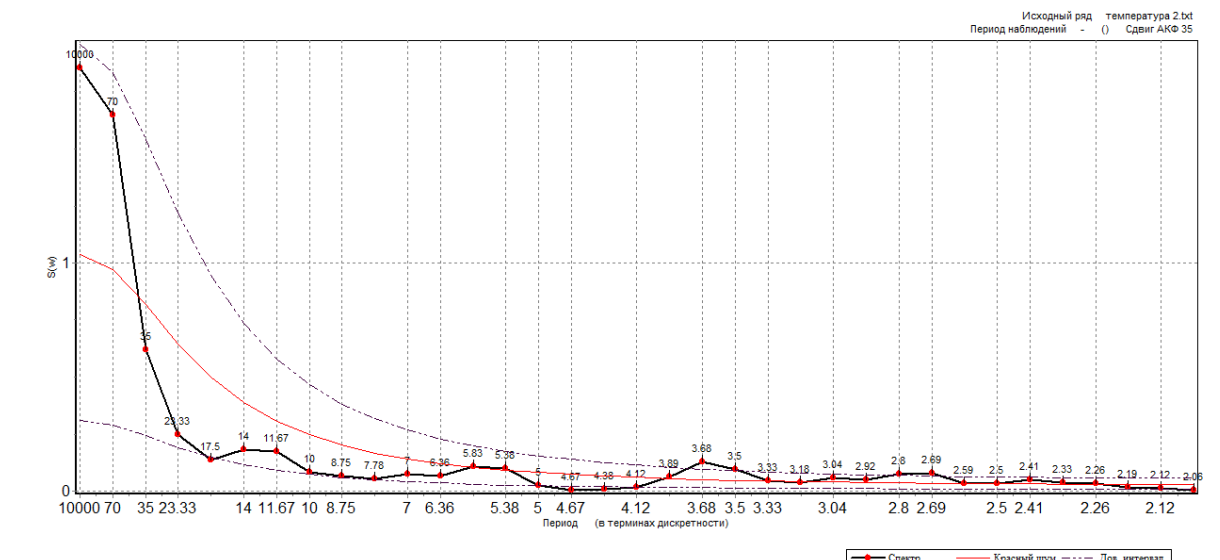


Рисунок 18. График спектральной плотности температуры поверхности Берингова моря с 1949 по 2025 г

По результатам спектрального анализа временного ряда давления в центре Арктического антициклона (1948–2021 гг.) построен график на рисунке 19. Спектральный анализ показал доминирующие квазипериоды давления 90 лет (2,2655) и 45 лет (1,0689), которые соответствуют вековому циклу солнечной активности Глайсберга и его первой гармонике. В отличие от температуры поверхности моря, в спектре давления отсутствуют выраженные декадные пики, связанные с Тихоокеанской декадной осцилляцией. В диапазоне от 2 до 7 лет присутствуют максимумы (наиболее заметные на периодах 2,2 года с плотностью 0,1399 и 2,25 года с плотностью 0,1259), отражающие влияние явления Эль Ниньо, однако их мощность ниже, чем в спектре температуры. Пики около 11,25 и 10 лет (плотность 0,1154 и 0,1186) соответствуют 11-летнему циклу Швабе–Вольфа, но уступают по амплитуде вековому циклу

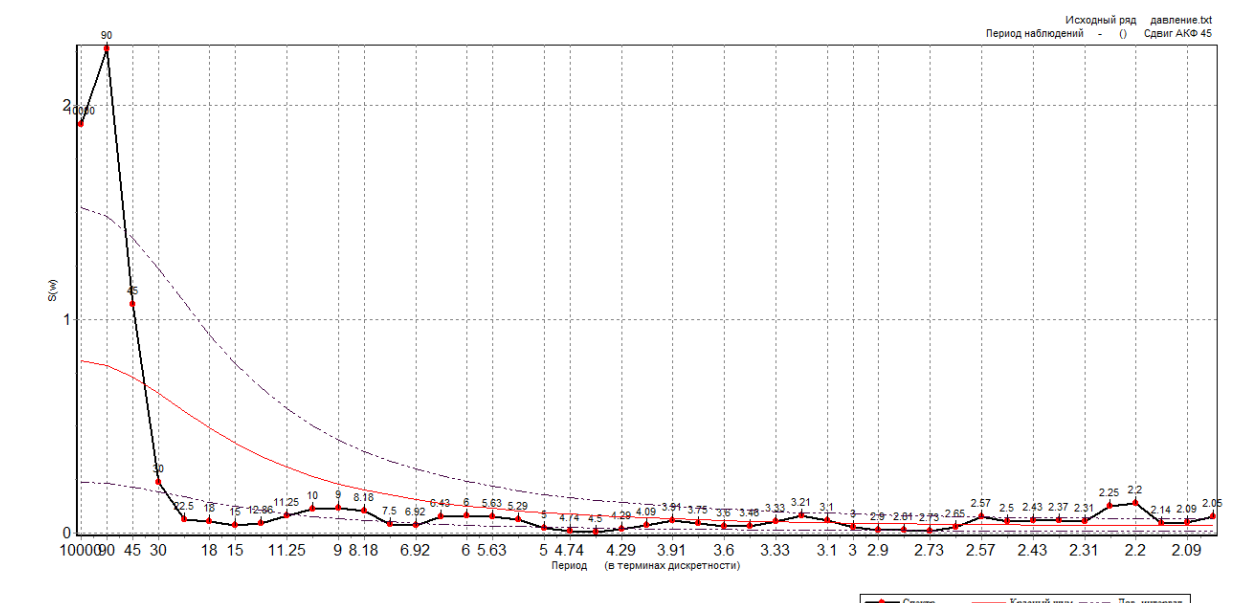


Рисунок 19. График спектральной плотности давления в центре Арктического антициклона с 1948 по 2021 г

На рисунке 20 изображен график, отражающий спектральную плотность по широте центра Арктического антициклона. Отрицательное значение спектральной плотности для периода 10000 лет ($-0,0389$) возникает при вычитании модели красного шума или при определённых методах оценки и не имеет физического смысла. Наиболее мощные пики зафиксированы на периодах 30 лет ($0,8398$), 2,9 года ($0,5793$), 45 лет ($0,5717$), 22,5 года ($0,4244$), 2,81 года ($0,3293$) и 4,29 года ($0,3178$). Периоды 30 и 45 лет могут быть связаны с гармониками вековой (90-летней) солнечной активности, однако их мощность существенно ниже, чем в спектре давления. Периоды около 22,5 и 11,25 лет соответствуют циклам Хейла и Швабе–Вольфа, что указывает на модуляцию широтного положения антициклона солнечной активностью. Широкий спектр пиков в диапазоне 2–7 лет (особенно выраженные на 2,9; 2,81; 4,29; 3,6; 2,57 года) обусловлен влиянием явления Эль-Ниньо и квазидвухлетней осцилляции. В отличие от температуры, в спектре широты отсутствуют мультидекадные пики около 70 лет, что согласуется с отсутствием долговременного тренда и бимодальным характером распределения широты (два предпочтительных положения около 75 и 80° с.ш.). Таким образом, изменчивость широты центра Арктического

антициклона формируется под преимущественным влиянием явления Эль-Ниньо (2–7 лет) и солнечной активности (11–45 лет), тогда как тихоокеанская декадная осцилляция не играет заметной роли.

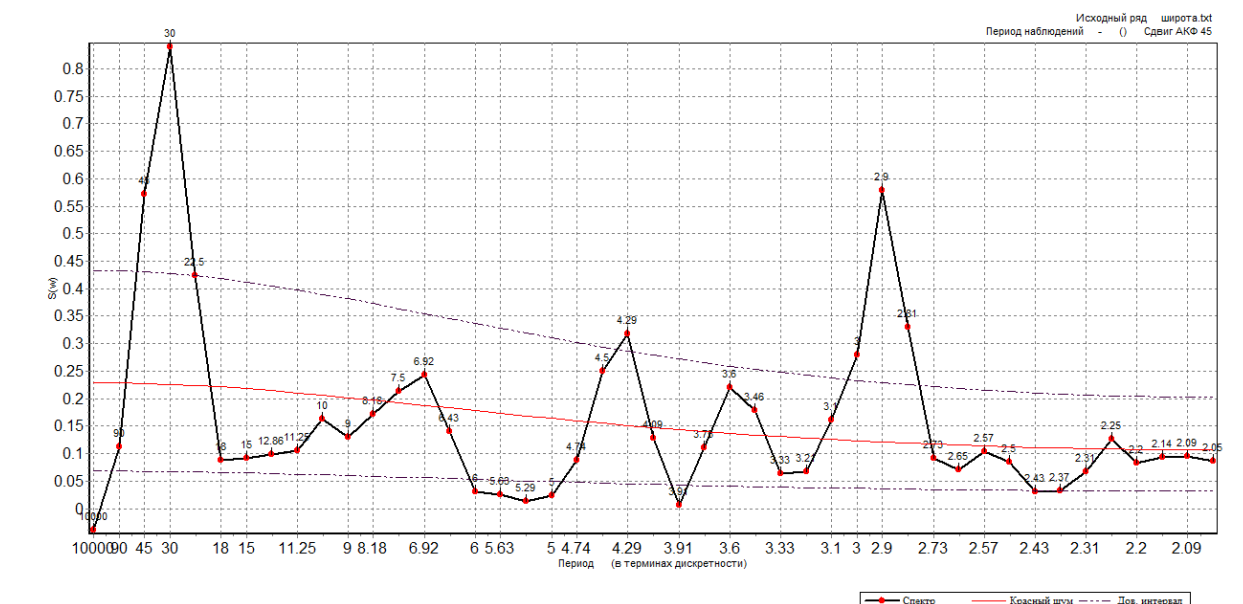


Рисунок 20. График спектральной плотности широты центра Арктического антициклона с 1948 по 2021 г

По результатам спектрального анализа долготы центра Арктического антициклона, показанного на рисунке 21, можно сделать следующие выводы. Наиболее мощный пик зафиксирован на периоде 3,6 года (0,4704), что соответствует внутридиапазонной частоте явления Эль-Ниньо. Высокие значения спектральной плотности также наблюдаются на периодах 18 лет (0,3541), 22,5 и 15 лет (около 0,295), 30 лет (0,2499), 2,2 года (0,2516) и 3,75 года (0,2559). Пики в диапазоне 2–7 лет (особенно на 3,6; 2,2; 2,81; 2,9; 2,14 года) традиционно связываются с явления Эль-Ниньо и квазидвухлетней осцилляцией. Периоды около 18, 22,5 и 30 лет могут соответствовать декадной и бидекадной изменчивости Тихоокеанской декадной осцилляции и её гармоникам, а также 22-летнему циклу Хейла солнечной активности. В отличие от широты, где доминировали периоды 30 и 45 лет, в спектре долготы наиболее выражен именно 18-летний пик, что может указывать на различную чувствительность зонального и меридионального положений антициклона к одним и тем же климатическим драйверам. Периоды около 11,25 и 9 лет

(0,0875 и 0,2278) связаны с 11-летним циклом Швабе–Вольфа. Отсутствие очень длинных (70–90 лет) доминирующих пиков, характерных для давления, согласуется с отсутствием долговременного тренда долготы и её хаотической изменчивостью, однако наличие чётких пиков в диапазоне 3–18 лет подтверждает существование предпочтительных зон локализации антициклона (180–250° в.д.) и более частых смещений к западу, выявленных при анализе гистограмм. Таким образом, изменчивость долготы центра Арктического антициклона формируется под комплексным воздействием явления Эль-Ниньо (2–7 лет), квазидвухлетняя осцилляция (около 2,2 года), Тихоокеанской декадной осцилляции (15–22,5 года) и солнечной активности (11 и 22 года), причём наибольший вклад вносят межгодовые колебания явления Эль-Ниньо и 18-летняя декадная ритмика.

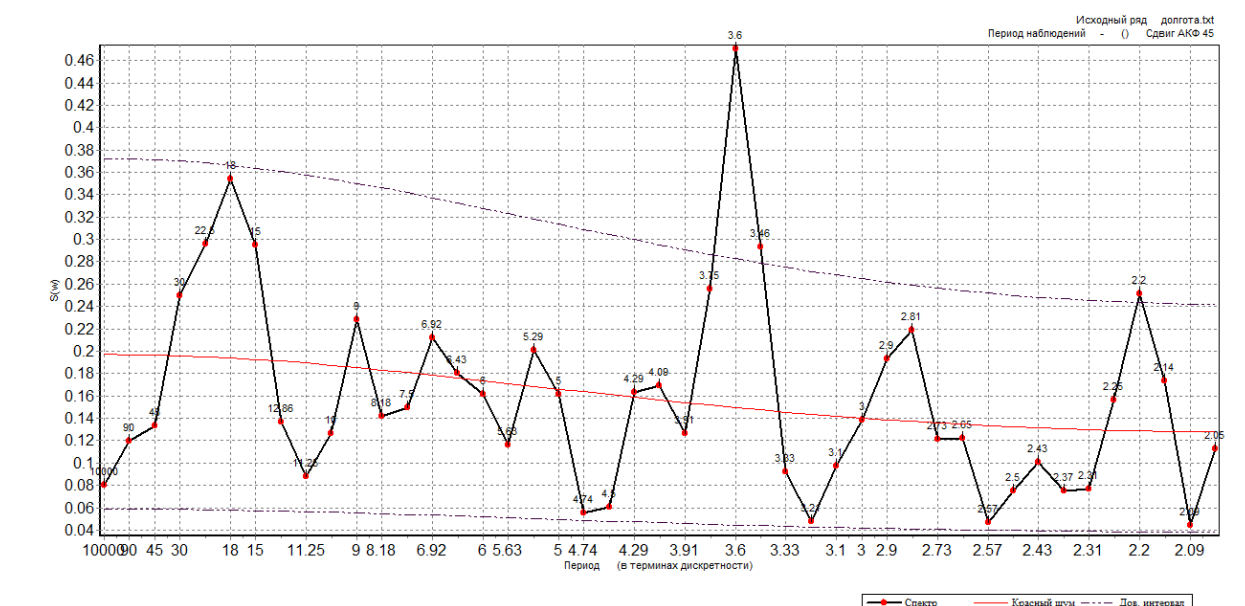


Рисунок 21. График спектральной плотности долготы центра Арктического антициклона с 1948 по 2021 г

На рисунке 22 представлен график спектральной плотности ледовитости Берингова моря. Наиболее мощные пики зафиксированы на периодах 30 лет (0,5589) и 15 лет (0,4950), что соответствует мультидекадной изменчивости Тихоокеанской декадной осцилляции и её первой гармонике. Период 10 лет (0,2564) может отражать 11-летний цикл солнечной активности Швабе–Вольфа. Пик на 7,5 года (0,1536) и группа пиков в диапазоне 3–5 лет (наиболее

выраженные на 3,75 года с плотностью 0,1746 и 4,29 года с плотностью 0,0946) соответствуют межгодовой изменчивости явления Эль-Ниньо. Относительно низкие значения спектральной плотности в области периодов короче 5 лет согласуются с тем, что ледовитость, будучи инерционным параметром, сглаживает высокочастотные флуктуации. Периоды 30 и 15 лет доминируют в спектре, что подтверждает определяющую роль Тихоокеанской декадной осцилляции в многолетней динамике ледовитости Берингова моря, а также отмечает вклад солнечной активности (10–11 лет) и явления Эль-Ниньо (3–7 лет). Полученные результаты хорошо согласуются с отрицательным трендом ледовитости, наблюдаемым в последние десятилетия, так как положительная фаза Тихоокеанской декадной осцилляции (связанная с потеплением) способствует сокращению ледового покрова.

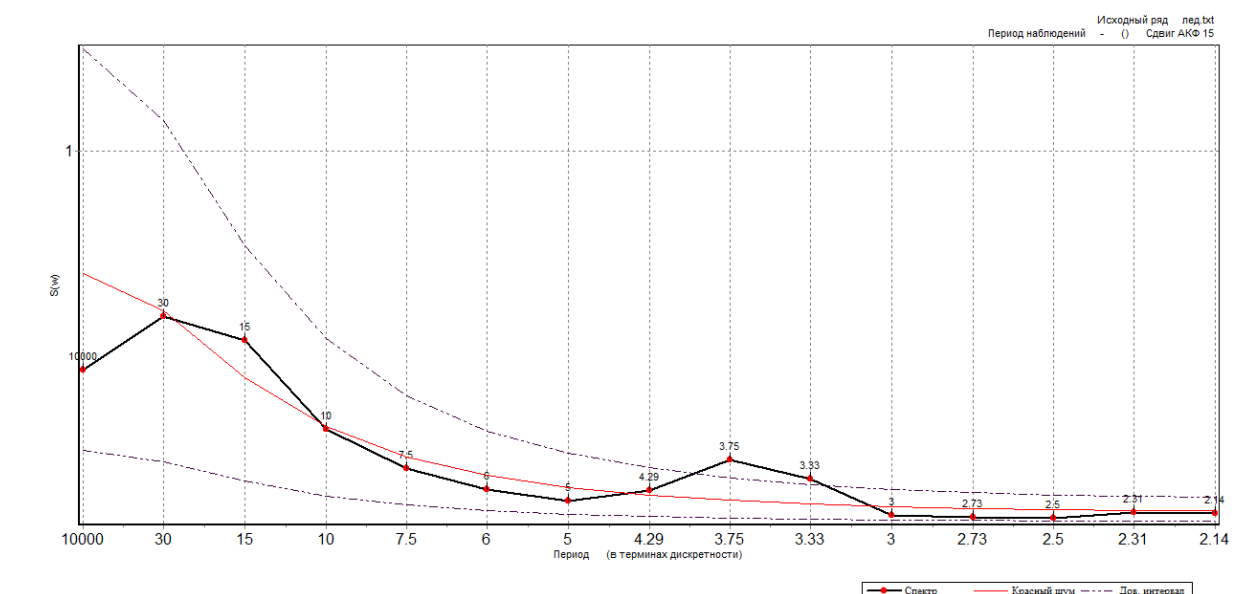


Рисунок 22. График спектральной плотности ледовитости Берингова моря с 1978 по 2025 г

Проведенный спектральный анализ параметров выявил различную структуру многолетней и межгодовой изменчивости. Температура поверхности и ледовитость имеют сильную связь с Тихоокеанской декадной осцилляцией и явления Эль-Ниньо, что отражает их трендовую динамику (потепление и сокращение льдов). Давление в центре Арктического антициклона сильнее всего подвержено вековому циклу солнечной

активности. Широта и долгота центра антициклона не имеют устойчивого тренда, но спектр значим в диапазонах 2–7 лет (явления Эль-Ниньо) и 11–22 года (солнечный цикл). Также для долготы значим 18–летний период, связанный с Тихоокеанской декадной осцилляцией.

3.4 Исследование временной изменчивости с помощью вейвлет-преобразования

Вейвлетный анализ позволяет локализовать периодические компоненты нестационарного сигнала одновременно по времени и масштабу, что дает возможность оценить флуктуации спектральных характеристик вдоль временного ряда.

На рисунке 23 представлен непрерывный вейвлетный спектр мощности среднегодовой температуры поверхности Берингова моря (1948–2021 гг.). По оси абсцисс отложены годы (номер временного сдвига от 1 до 78), по оси ординат – масштаб (квазипериод в годах). Цветовая гамма от синего к красному отражает величину спектральной плотности. Была выявлена повышенная мощность в диапазоне 2–5 лет с максимумами около 2,4–2,6 и 3,0–3,6 лет, что соответствует квазидвухлетней осцилляции и межгодовой изменчивости явления Эль-Ниньо. Второстепенная область 8–11 лет и 22 года связаны с 11-летним циклом солнечной активности. Характерно резкое усиление мощности на всех масштабах в последние два десятилетия. Мультидекадные колебания (периодами более 15 лет) выражены слабо. Полученные результаты согласуются с данными классического спектрального анализа Фурье, подтверждая устойчивость выделенных периодичностей. Выявленная динамика спектральной мощности может служить индикатором перестройки климатической системы Берингова моря под воздействием глобального потепления.

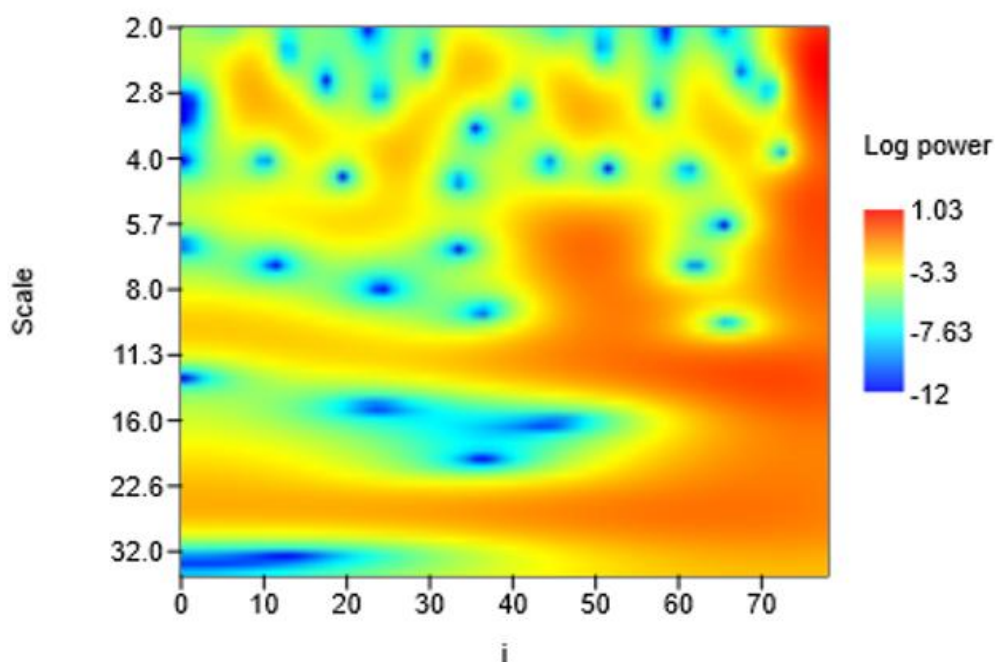


Рисунок 23. Вейвлетный спектр по температуре поверхности Берингова моря

Вейвлетный спектр, изображенный на рисунке 24, выявил, что максимальная мощность колебаний сосредоточена в диапазоне 5–7 лет с пиками на 5,8–6,9 года (плотность до 26,6), что соответствует явлению Эль-Ниньо. Второй по значимости диапазон 8–12 лет (плотность до 14,4) связан с 11-летним циклом солнечной активности. Колебания на периодах 15–20 лет (плотность до 5,9) отражают влияние Тихоокеанской декадной осцилляции и 22-летнего цикла Хейла. Характерно постепенное усиление мощности в диапазоне 5–7 лет во второй половине ряда, что указывает на рост явления Эль-Ниньо на барическое поле региона в последние десятилетия. Мультидекадные колебания (>30 лет) выражены слабо.

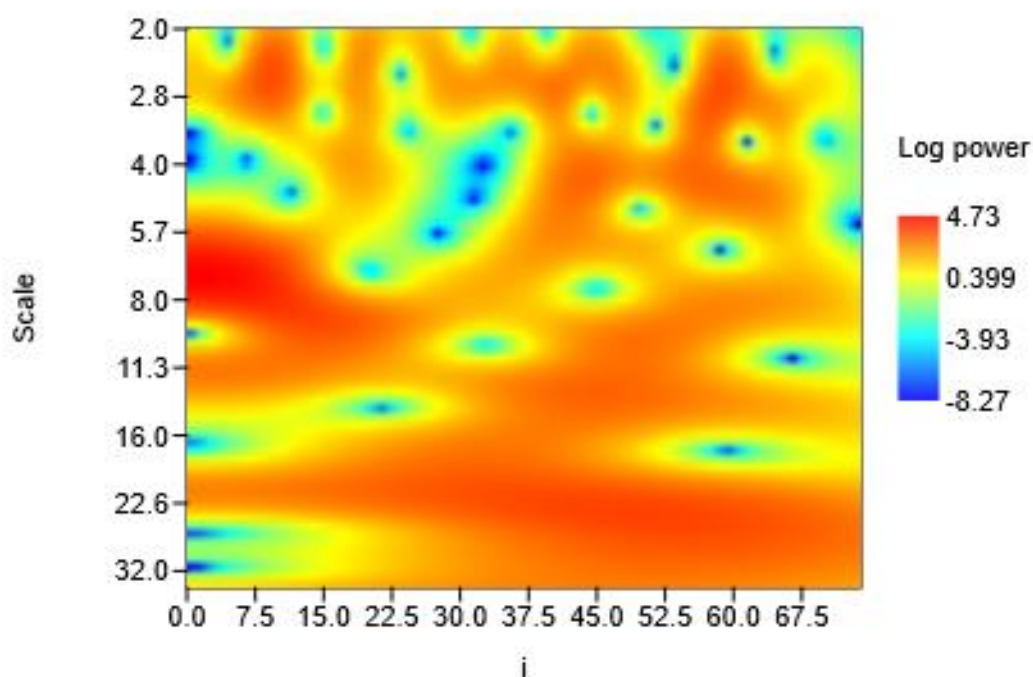


Рисунок 24. Вейвлетный спектр по давлению Арктического антициклона

Вейвлетный спектр широты центра Арктического антициклона за период 1948–2021 годов, представленный на рисунке 25, показал максимальную мощность в диапазоне 2–4 лет с пиками около 2,0–2,2 и 3,0–3,6 года, что соответствует квазидвухлетней осцилляции и явлению Эль-Ниньо. Дополнительные пики выявлены на периодах 8–12 лет (11-летний цикл солнечной активности) и 15–20 лет (Тихоокеанская декадная осцилляция и 22-летний цикл Хейла). В первой половине ряда (1940–1960-е) доминировали высокочастотные колебания 2–4 года, а после 1980-х усилилась роль периодов 8–12 и 15–20 лет. Колебания с периодами более 30 лет слабы, что согласуется с отсутствием многолетнего тренда широты. Результаты указывают на комплексное воздействие внутриа́тмосферных процессов и внешних факторов на широтное положение антициклона.

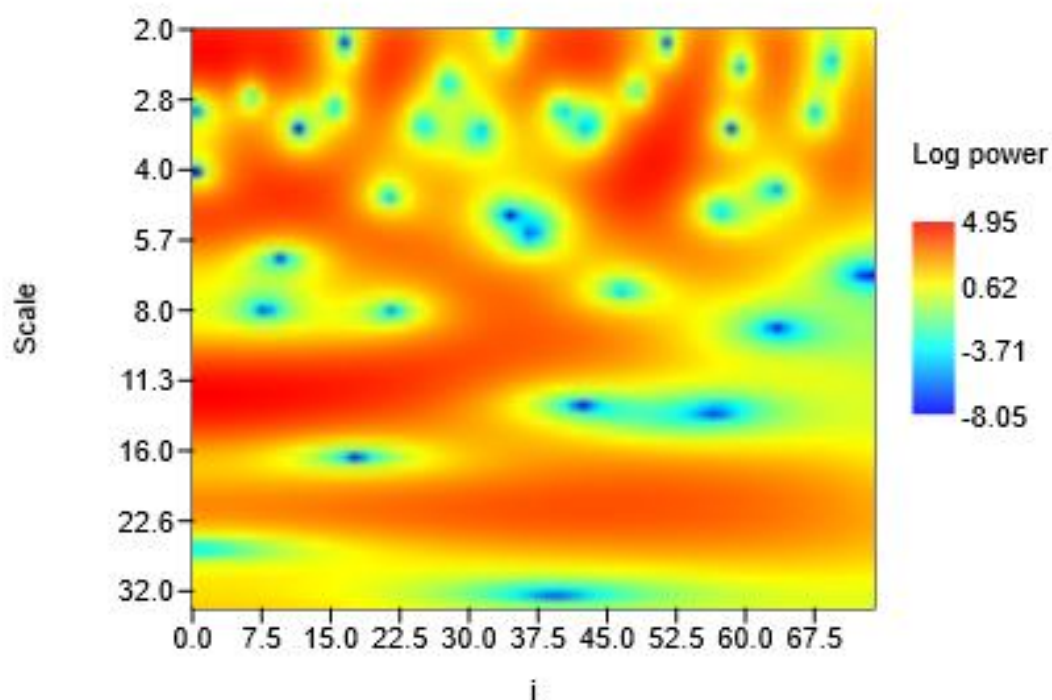


Рисунок 25. Вейвлетный спектр по широте центра Арктического антициклона

Вейвлетный спектр долготы центра Арктического антициклона (1948–2021 гг.) на рисунке 26 показал наиболее мощные колебания на периодах 27–33 лет, что связано с Тихоокеанской декадной осцилляцией и вековыми вариациями солнечной активности. Второй по значимости диапазон – 12–15 лет, соответствующий 11-летнему циклу Швабе–Вольфа. Колебания 2–5 лет (пики 2,0–2,2 и 3,0–3,6 года) отражают квазидвухлетнюю осцилляцию и Эль-Ниньо. Важной особенностью является усиление мультидекадной компоненты (27–33 года) во второй половине ряда. Колебания с периодами более 33 лет слабы, что согласуется с отсутствием векового тренда долготы. Полученные результаты указывают на комплексное воздействие высокочастотных и мультидекадных факторов, причём роль последних возросла в последние десятилетия.

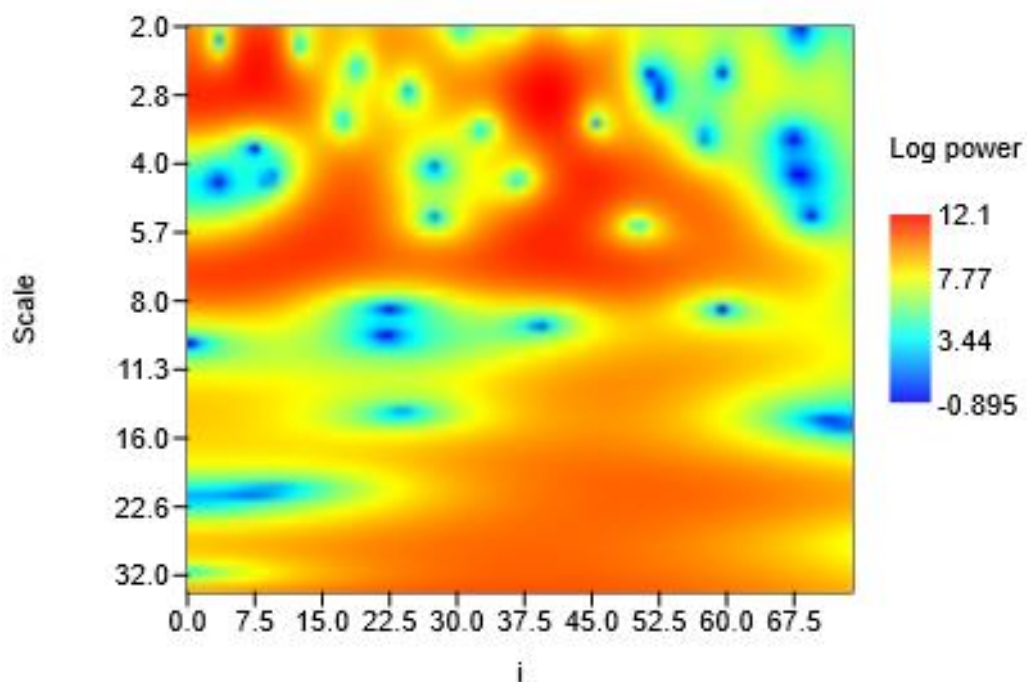


Рисунок 26. Вейвлетный спектр по долготе центра Арктического антициклона

Вейвлетный спектр ледовитости (период 1978–2025 гг., 48 лет) был проанализирован и выявил несколько характерных диапазонов повышенной спектральной плотности (рисунок 27). Наиболее мощные колебания зафиксированы на коротких периодах от 2 до 5 лет. Это соответствует квазидвухлетней осцилляции стратосферы и межгодовой изменчивости явления Эль-Ниньо. Второй по значимости диапазон охватывает периоды около 8–12 лет, что связано с 11-летним циклом солнечной активности Швабе–Вольфа. На масштабах 15–20 лет наблюдается менее выраженный, но устойчивый пик, отражающий влияние Тихоокеанской декадной осцилляции и 22-летнего цикла Хейла, особенно в последние годы.

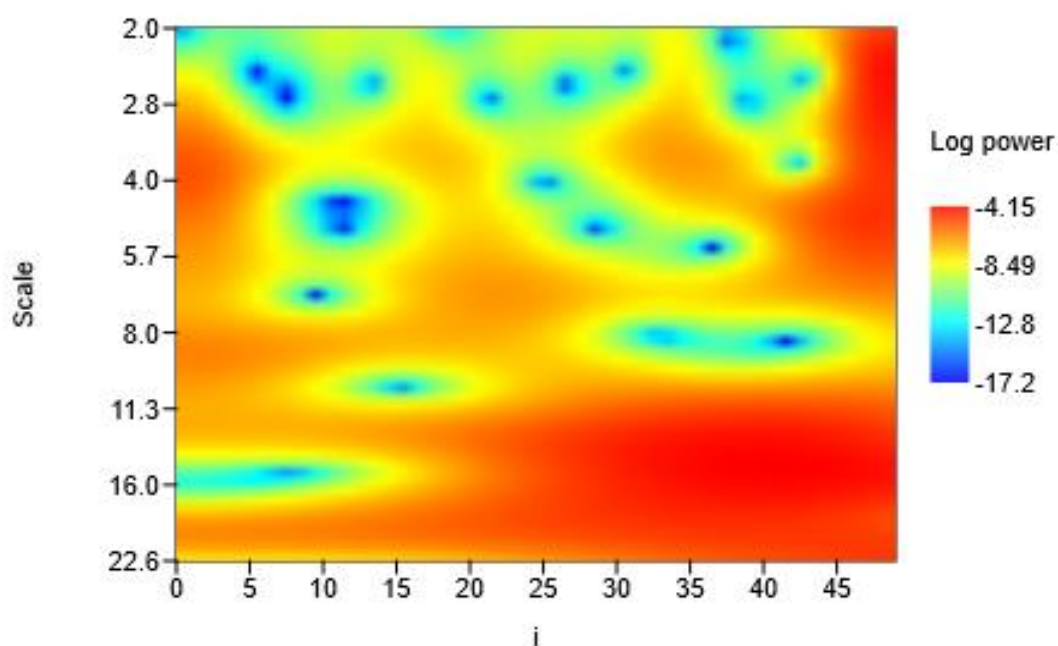


Рисунок 27. Вейвлетный спектр по ледовитости Берингова моря

Вейвлет-спектры пяти параметров Берингова моря показали, что их изменчивость формируется под действием общих глобальных факторов (Эль-Ниньо с периодами 2–7 лет и 11-летнего цикла солнечной активности), но с разной степенью выраженности.

3.5 Анализ взаимозависимостей с помощью корреляционной матрицы

Значения коэффициентов корреляции позволяют оценить силу и направление линейных связей между параметрами. В таблице 1 представлены результаты корреляции между ледовитостью, давлением, широтой, долготой и температурой. Наиболее сильная связь обнаружена между ледовитостью и температурой: коэффициент составляет $-0,61$. Отрицательный знак подтверждает обратную зависимость, то есть с ростом температуры ледовитость снижается, что физически объяснимо и согласуется с глобальным потеплением. Умеренная по силе отрицательная корреляция также наблюдается между температурой и широтой ($-0,27$) и температурой и давлением ($-0,23$): повышение температуры сопровождается незначительным смещением антициклона к югу и снижением давления. Связь температуры с долготой положительная и умеренная ($0,27$): более теплые годы

соответствуют восточному смещению центра антициклона. Долгота демонстрирует наиболее выраженную отрицательную корреляцию с давлением ($-0,54$): при росте давления центр антициклона смещается к западу. Связь долготы с ледовитостью ($-0,11$) и широтой ($-0,10$) очень слабая. Остальные параметры имеют слабую незначительную связь.

Таблица 1. Корреляционная матрица по абиотическим параметрам

	<i>Ледовитость</i>	<i>ТПО</i>	<i>Давление</i>	<i>Широта</i>	<i>Долгота</i>
<i>Ледовитость</i>	1				
<i>ТПО</i>	-0.61	1			
<i>Давление</i>	0.20	-0.23	1		
<i>Широта</i>	0.12	-0.27	0.07	1	
<i>Долгота</i>	-0.11	0.27	-0.54	-0.10	1

В таблице 2 представлен фрагмент корреляционной матрицы. Ряды данных по минтаю и общему вылову значительно короче остальных, поэтому соответствующие оценки менее точны. Поскольку одной из задач работы является оценка влияния абиотических факторов на рыбопромысел, именно этот фрагмент показывает, что связь между абиотическими параметрами и биологическими объектами наблюдается слабо. Наиболее заметная зависимость обнаружена между ледовитостью и общим выловом: ледяной покров напрямую влияет на доступность рыбы для промысла.

Таблица 2. Фрагмент корреляционной матрицы

	<i>Ледовитость</i>	<i>ТПО</i>	<i>Давление</i>	<i>Широта</i>	<i>Долгота</i>	<i>Минтай</i>	Общий вылов
Минтай	-0.13	-0.01	-0.12	-0.04	-0.03	1	
Общий вылов	0.32	0.12	-0.13	0.00	0.22	-0.36	1

На рисунке 28, представлено корреляционное поле зависимости температуры от ледовитости, связь составляет $-0,61$ и имеет значимость по критерию студента.

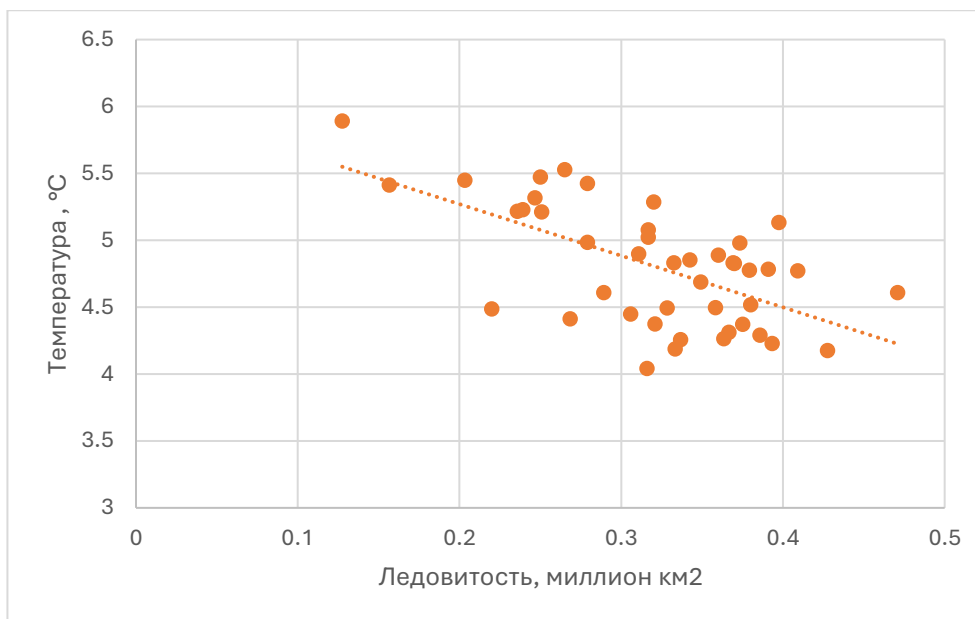


Рисунок 28. Графическое отображение корреляции между температурой и ледовитостью

На рисунке 29 представлено графическое отображение корреляции между температурой и давлением, формирующее «облако» точек, что говорит о слабой связи параметров.

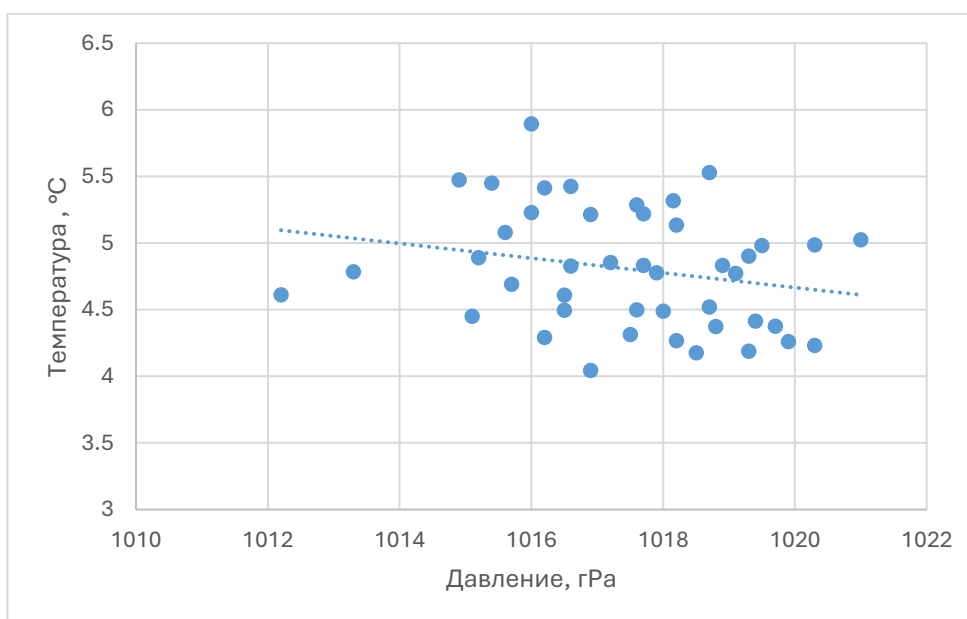


Рисунок 29. Графическое отображение корреляции между температурой и давлением

На рисунке 30 была построена связь температуры и долготы, которая имеет положительное значение корреляции 0,27, что указывает на их прямую зависимость.

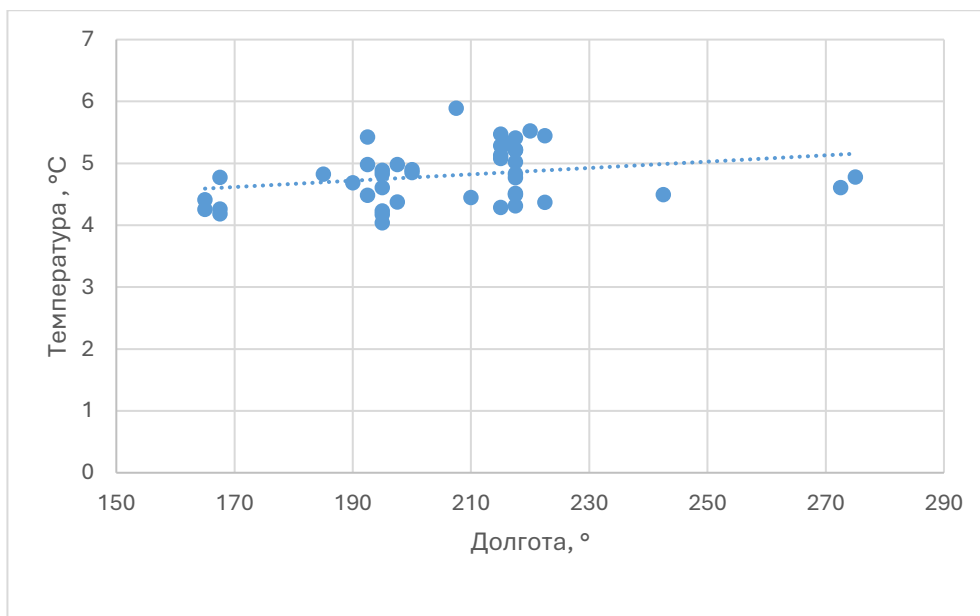


Рисунок 30. Графическое отображение корреляции между температурой и долготой

На рисунке 31 представлена связь долготы и давления, которая имеет отрицательную корреляцию $-0,54$, а «облако» представляет собой форму шарообразного эллипса.

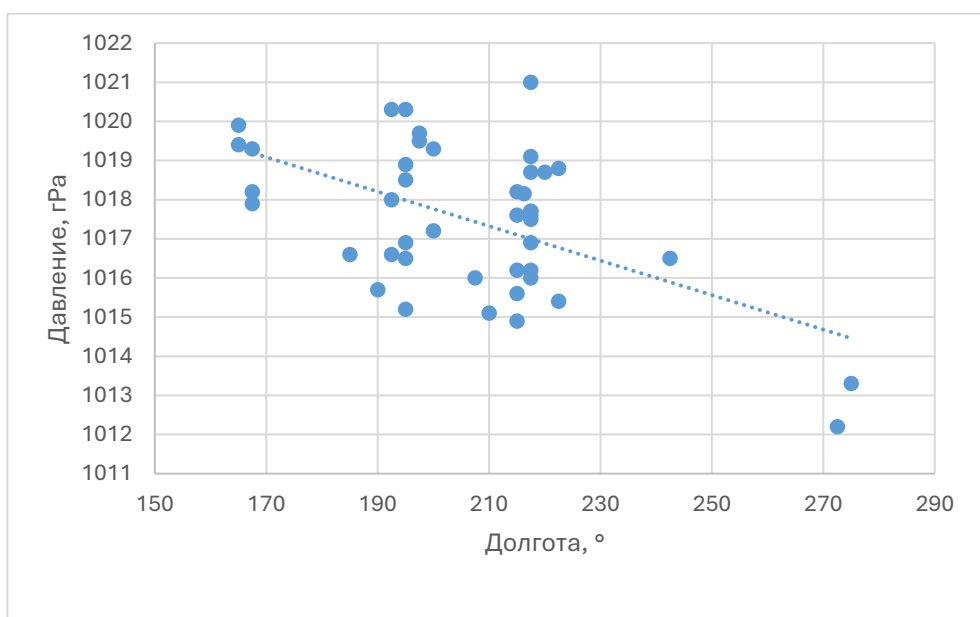


Рисунок 31. Графическое отображение корреляции между давлением и долготой

Связь между всеми параметрами слабая и не значительная, кроме ледовитости и температуры, а также долготы и давления. Остальные не значимы по коэффициенту Стьюдента.

3.6 Фильтрация рядов

Для выделения наиболее информативных частотных диапазонов во временных рядах гидрометеорологических параметров применялся фильтр Баттерворта, характеризующийся максимально гладкой амплитудно-частотной характеристикой в полосе пропускания. Данный метод позволил подавить высокочастотный шум и изолировать низкочастотные (межгодовые и мультидекадные) колебания, что обеспечило последующий корректный спектральный и корреляционный анализ.

На рисунке 32 представлен результат выделения несущих диапазонов частот с помощью фильтра Баттерворта для временного ряда ледовитости. Линия тренда отражает наиболее энергетически значимую составляющую, соответствующую доминирующему пику на спектре. Остальные частотные компоненты при таком отображении становятся неразличимы, однако они вносят важный вклад в общую изменчивость процесса.

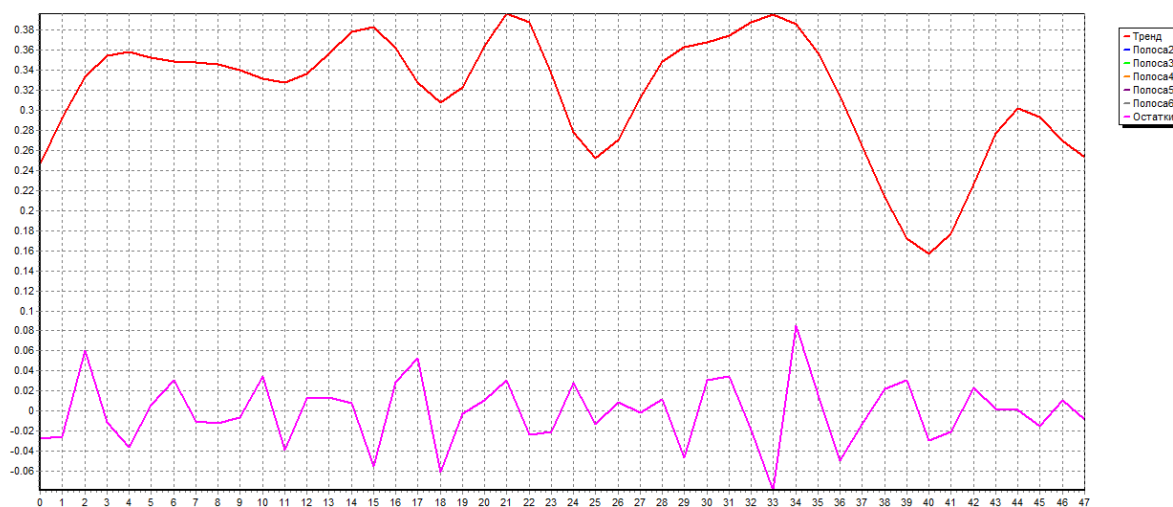


Рисунок 32. Выделение несущих диапазонов частот фильтром Баттерворта для ряда ледовитости

На рисунке 33 фильтром Баттерворта выделен пик, соответствующий наиболее энергетически значимой низкочастотной составляющей ряда ледовитости (долговременному тренду). Эта компонента отражает устойчивое сокращение ледового покрова Берингова моря в рассматриваемый период.

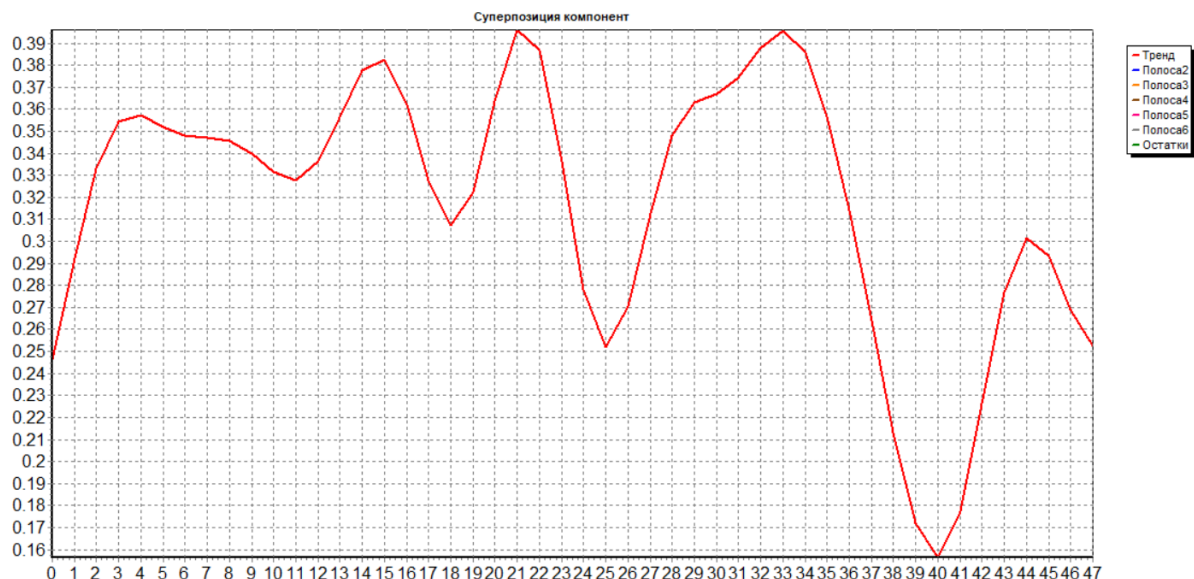


Рисунок 33. Выделенный пик фильтром Баттерворта для ряда ледовистости

На рисунке 34 представлены остаточные компоненты временного ряда ледовитости, полученные после выделения фильтром Баттерворта тренда и основных частотных полос. Эти остатки в совокупности вносят 62% вклада в общую изменчивость исходного ряда.

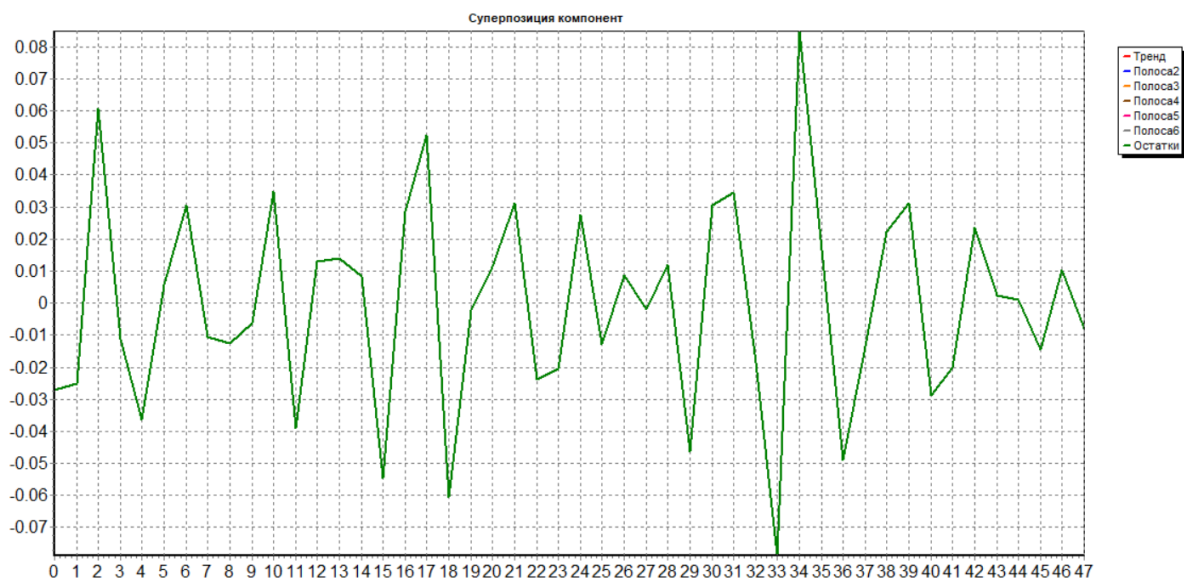


Рисунок 34. Выделенные остаточные компоненты фильтром Баттерворта для ряда ледовистости

На рисунке 35 представлен результат выделения несущих диапазонов

частот фильтром Баттерворта для временного ряда температуры поверхности моря. Линия тренда отражает основную долговременную составляющую (потепление), тогда как выделенные полосы и остатки в совокупности описывают менее энергетически значимые колебания.

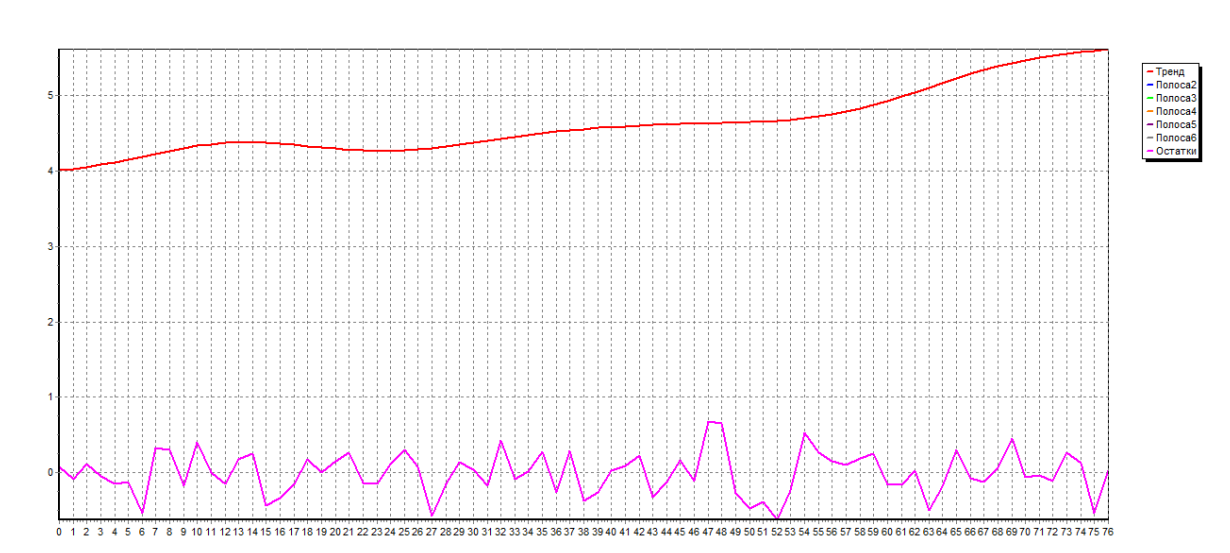


Рисунок 35. Выделение несущих диапазонов частот фильтром Баттерворта для ряда температуры поверхности моря

На рисунке 36 фильтром Баттерворта выделен доминирующий пик (тренд) временного ряда температуры поверхности моря, соответствующий устойчивому потеплению в последние десятилетия. Остальные частотные составляющие, не показанные на данном рисунке, в совокупности вносят меньший вклад в общую изменчивость.

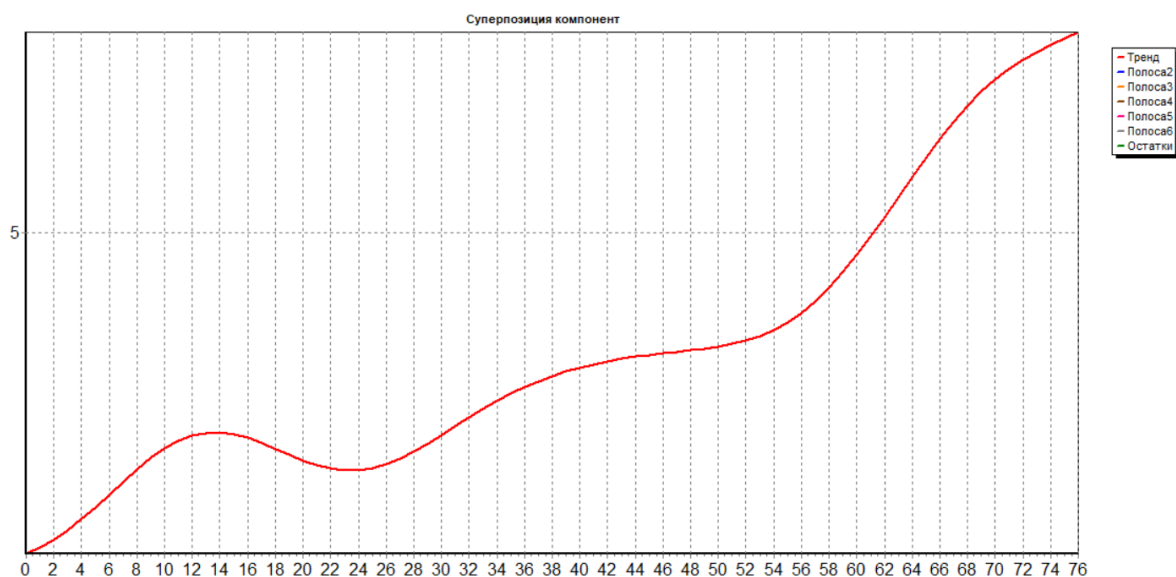


Рисунок 36. Выделенный пик фильтром Баттерворта для ряда температуры

На рисунке 37 показаны остаточные компоненты временного ряда температуры поверхности моря, полученные после применения фильтра Баттерворта для удаления тренда и основных частотных полос. Эти остатки отражают высокочастотную изменчивость (шум) и мелкомасштабные флуктуации, которые не объясняются выделенными несущими диапазонами и вносят вклад в дисперсию порядка 29,5%.

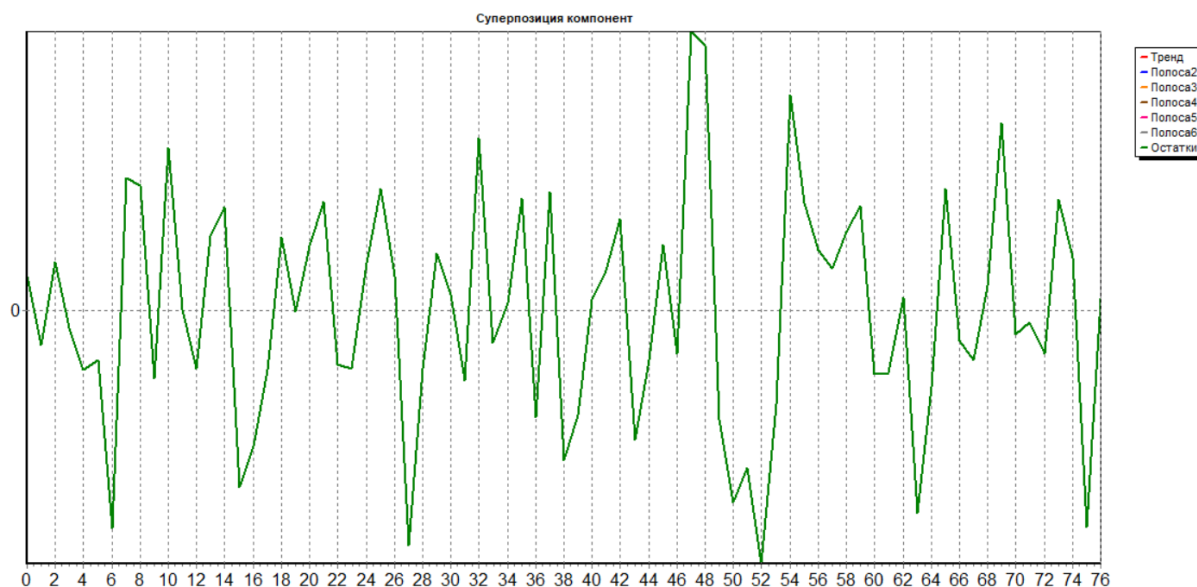


Рисунок 37. Выделенные остаточные компоненты фильтром Баттерворта для ряда температуры

Фильтр Баттерворта позволил выделить тренд и оценить вклад остаточных компонент: для ледовитости он составил 62 %, для температуры поверхности моря 29,5 %. В отличие от спектрального анализа Фурье, фильтрация эффективно подавляет шум, но уступает вейвлет-анализу в локализации периодичностей во времени.

3.7 Оценка возможности прогнозирования статистическими методами

Для оценки возможности статистического прогнозирования гидрометеорологических параметров Берингова моря целесообразно использовать методы автопрогноза, основанные на анализе автокорреляционной функции временных рядов. Такой подход позволяет

выявить степень зависимости будущих значений от предшествующих и определить горизонт, на котором статистическая связь сохраняется значимой.

На рисунке 38 фактический ряд ледовитости сопоставлен с прогнозом, полученным методом экстраполяции. Качество прогноза нельзя признать удовлетворительным, так как прогноз заметно расходится с фактическими значениями, что связано с наличием высокочастотных шумов и нестационарностью процесса, не учитываемых при простой экстраполяции.

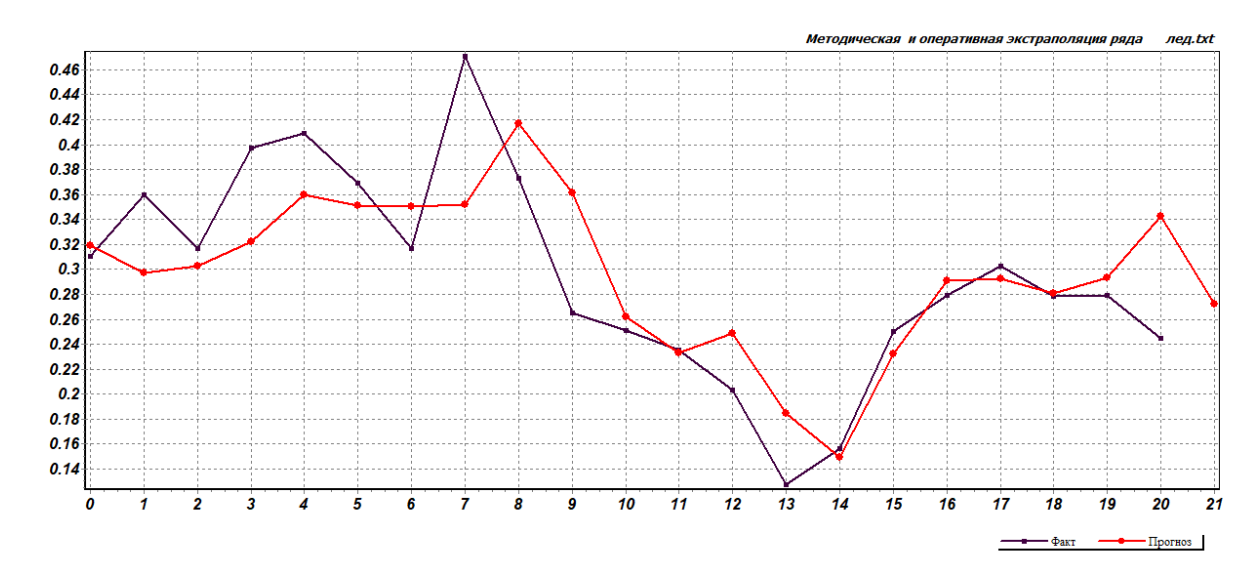


Рисунок 38. График прогноза ледовитости Берингова моря методом экстраполяции

Таблица 3. Оценка качества и эффективности различных методов прогнозирования ледовитости Берингова моря

Эффективность							
Метод	Надёжность	ЗАБЛАГОВРЕ	Средн.ошиб	Дисперс.ошиб	Опр. ЗНАК	Опр. 0.67 Сиг	Опр. 0.80 Сиг
Факт	0	3000	0	0	100	100	100
Климат	0.9524	0	0.0219	0.0066	28.5714	47.619	57.1429
Инерция	0.557	3.6897	0.0016	0.0039	71.4286	71.4286	71.4286
Байес	0.5121	4.1866	0.0081	0.0036	71.4286	76.1905	76.1905
Дин-Стат	0.903	1.2865	0.0269	0.0063	57.1429	57.1429	61.9048
Дин-Стох	0.5159	4.1408	0.0111	0.0036	71.4286	71.4286	76.1905
АР-1	0.596	3.3138	0.0091	0.0041	71.4286	61.9048	66.6667
АР-2	0.6986	2.5038	0.0136	0.0048	80.9524	61.9048	66.6667
АР-3	0.693	2.5423	0.0106	0.0048	80.9524	57.1429	66.6667
Фурье	0.5965	3.309	-0.0127	0.0041	71.4286	71.4286	76.1905
Сред.компл.	0.5839	3.4253	0.01	0.0041	71.4286	61.9048	71.4286
Регр.компл.	0.3753	6.3898	0.0021	0.0026	76.1905	71.4286	80.9524

В таблице 3 представлены показатели надёжности, заблаговременности, средней и дисперсионной ошибки, а также вероятности правильного определения знака отклонения, превышения порога 0,67 и 0,80 от нормы. Для последних 3 столбцов, выраженных в процентах, более высокие значения свидетельствуют о лучшей способности модели предсказывать направление изменения или выход за заданные пределы. Наибольшие проценты (до 80–81 %) демонстрируют модели AP-2, AP-3, Регрессионная комплексная, что указывает на их преимущество в воспроизведении знаковых и пороговых характеристик процесса. В то же время климатический прогноз обладает максимальной надёжностью (0,9524), но нулевой заблаговременностью, что делает его непригодным для оперативных предсказаний. Лучший баланс между надёжностью, заблаговременностью и процентными критериями показывают авторегрессионные модели и регрессионная комплексная модель.

На рисунке 39 представлен прогноз ледовитости, построенный на остаточных компонентах после фильтрации исходного ряда. В отличие от прогноза по необработанным данным (рисунок 38), здесь качество модели существенно улучшилось: прогнозные значения значительно ближе к фактическим, что свидетельствует о высокой предсказательной способности метода при работе с очищенными от тренда и низкочастотного шума остатками. Таким образом, выделение остаточных компонент позволяет повысить точность статистического прогнозирования.

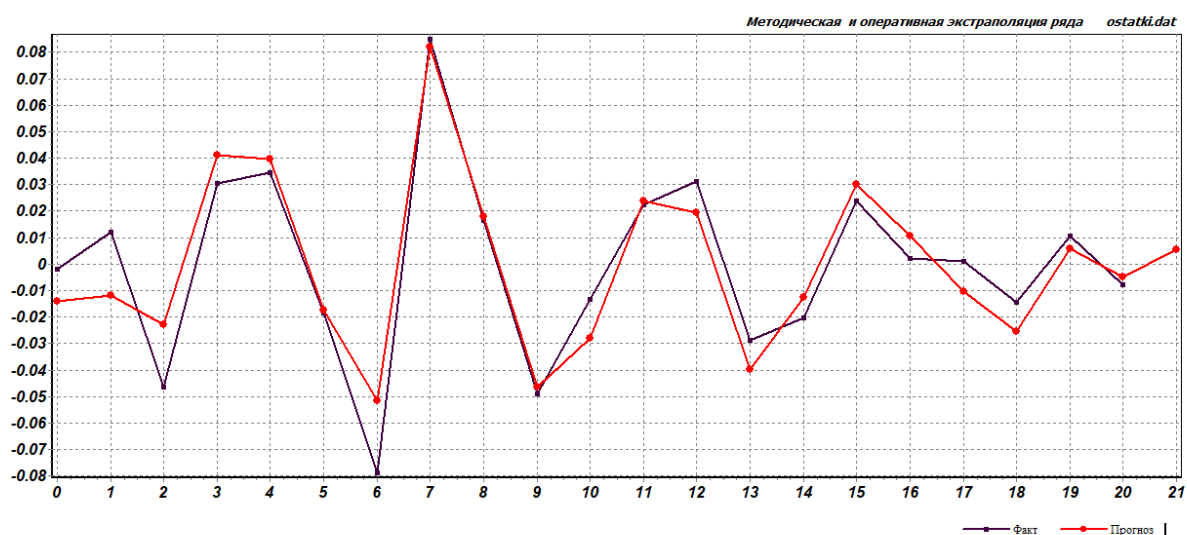


Рисунок 39. График прогноза ледовитости Берингова моря методом экстраполяции построенный на остаточных компонентах

Таблица 4. Оценка качества и эффективности различных методов прогнозирования ледовитости Берингова моря по остаточным компонентам

Эффективность							
Метод	Надёжность	ЗАБЛАГОВРЕ	Средн.ошиб	Дисперс.ошиб	Опр. ЗНАК	Опр. 0.67 Сиг	Опр. 0.80 Сиг
Факт	0	3000	0	0	100	100	100
Климат	0.9524	0.9857	-0.0001	0.0012	52.381	57.1429	61.9048
Инерция	2.3808	0	0.0008	0.0029	38.0952	42.8571	47.619
Байес	1.596	0	0.0005	0.002	38.0952	52.381	57.1429
Дин-Стат	0.5094	4.2187	0.0032	0.0006	85.7143	71.4286	76.1905
Дин-Сток	1.4218	0	0.0004	0.0018	38.0952	52.381	57.1429
АР-1	0.9475	1.0183	-0.0008	0.0012	61.9048	57.1429	57.1429
АР-2	0.5147	4.1552	-0.0012	0.0006	66.6667	71.4286	76.1905
АР-3	0.2938	8.6505	-0.0037	0.0004	90.4762	76.1905	80.9524
Фурье	1.1566	0	-0.0034	0.0014	38.0952	52.381	52.381
Сред.компл.	0.7833	1.9631	-0.0005	0.001	71.4286	71.4286	76.1905
Регр.компл.	0.1211	23.4145	-0.0003	0.0001	90.4762	90.4762	100

В таблице 4 показан прогноз по остаточным компонентам существенно точнее: динамически-статистическая модель, авторегрессионная модель 3 и регрессионная комплексная модель дают высокую надёжность (до 90–100 % правильного определения порогов) и малые ошибки.

Остатки существенно повышают точность прогнозов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы было установлено, что температура поверхности Берингова моря и ледовитость имеют устойчивые противоположные тренды. Потепление сопровождается сокращением ледяного покрова, особенно в последние два десятилетия. Спектральный анализ и вейвлет преобразование выявили общие для всех параметров периодичности 2–7 лет, соответствующие явлению Эль-Ниньо, и 11–22 года циклы солнечной активности. Для температуры и ледовитости также выявлены мультидекадные ритмы 15–30 лет, связанные с Тихоокеанской декадной осцилляцией. Наиболее сильная связь обнаружена между температурой и ледовитостью (-0.61), тогда как связи абиотических факторов с рыбопромысловыми показателями слабы. Фильтрация рядов позволила разделить тренд и шумы, что позволило улучшить точность прогнозирования, так как прямая экстраполяция рядов дает низкое качество прогноза. Следовательно, статистическое прогнозирование абиотических факторов Берингова моря дает возможность обоснованно оценить реакцию биологической составляющей на изменение окружающей среды.

Список литературы

1. Атлас океанов. Тихий океан. – Л.: ГУНиО МО СССР, 1974. – 302 с.
2. Берингово море. Большая российская энциклопедия. [Электронный ресурс] URL: <https://bigenc.ru/c/beringovo-more-de3d2d?ysclid=mj6cvaq3o2503713443> (дата обращения: 14.12.2025)
3. Гордеева С. М. Практикум по курсу «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». – [б. м.], 2023. – 19 с.
4. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М., Изд-во МГУ, 1982 г. С ил., 142 с
5. Лучин В.А. Типовые распределения температуры воды верхнего квазиоднородного слоя Берингова моря в зимний период. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tipovye-raspredeleniya-temperatury-vody-verhnego-kvaziodnorodnogo-sloya-beringova-morya-v-zimniy-period/viewer> (дата обращения: 14.12.2025)
6. Температура поверхности океана. Ventusky [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.ventusky.com/ru> (дата обращения: 03.06.2026)
7. Fisheries Management and Assessment Reports for the Bering Sea and Aleutian Islands Region [Электронный ресурс] / North Pacific Fishery Management Council (NPAFC). – 2023. – URL: <https://www.npfmc.org/> (дата обращения: 14.12.2025)
8. Magadan Research Institute of Fisheries. Общий допустимый улов (ОДУ) и вылов по зонам Дальневосточного бассейна. – ФГБНУ «ВНИРО», 2025. – 94 с.
9. NASA EarthData Giovanni [Электронный ресурс] – URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> (дата обращения: 30.05.2026)