



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Особенности синоптических процессов при сильном волнении в
Баренцевом море»

Исполнитель Миронов Роман Андреевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Лаврова Ирина Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой



(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«08» июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ.....	5
1.1. Общие сведения о районе исследования.....	5
1.2. Климатический анализ Баренцева моря	6
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНЕНИЯ И МЕТОДЫ ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ	9
2.1 Общие сведения.....	9
2.2 Численные модели прогноза волнения.....	12
2.3 Критерии сильного волнения в Баренцевом море.....	13
ГЛАВА 3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПО РЕЖИМУ ВОЛНЕНИЯ БАРЕНЦЕВА МОРЯ. АНАЛИЗ СИНОПТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ СИЛЬНОМ ВОЛНЕНИИ.....	18
3.1. Анализ повторяемости волнения над акваторией Баренцева моря...	18
3.2. Годовой ход повторяемости волнения по месяцам	29
3.3. Распределение волн по градациям по районам	32
3.4. Розы ветров при сильных волнениях в Баренцевом море	34
3.5 Синоптический анализ случаев с сильным волнением	38
3.6 Синоптический анализ при появлении очень сильного волнения для 3 районов.	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	46

Введение

Одним из важнейших морей для России является Баренцево море, которое не только славится своими рыбными богатствами и уникальностью в рамках Северного Ледовитого океана, но и имеет экономическое значение. В Баренцевом море выявлены крупные залежи природных ресурсов – нефти и газа, которые становятся ключевым фактором в обеспечении энергетической безопасности данного региона. Тем не менее, эксплуатация этих месторождений сопряжена с высоким риском негативного воздействия на экосистемы, что приводит к необходимости строгого отслеживания и регулирования всех процессов в этой области.

Особенность этого моря обусловлена присутствием Гольфстрима – теплого атлантического течения, обеспечивающего в юго-западной части моря пребывание воды в жидком состоянии даже зимой, за счет чего у Российской Федерации круглый год открыта морская артерия. Незамерзающий порт Мурманска играет неотъемлемую роль как в стратегии развития экономических связей, так и в обеспечении оборонительной безопасности страны.

Актуальность:

Баренцево море является ключевым регионом Арктики, где интенсивные синоптические процессы (циклоны, штормовые ветра, волнения) оказывают значительное влияние на судоходство, добычу полезных ископаемых и состояние экосистемы. В условиях изменения климата отмечается рост повторяемости экстремальных погодных явлений, что повышает риски для человеческой деятельности. Изучение особенностей синоптических условий при сильном волнении необходимо для совершенствования методов прогнозирования и минимизации экономических потерь.

Цель работы — выявление закономерностей синоптических процессов, приводящих к возникновению сильного волнения в Баренцевом море.

Задачи исследования:

- Формирование массива данных по ветру и волнению по акватории Баренцева моря;
- Построение и анализ карт повторяемости волнения 3 м и более, 5 м и более по данным реанализа;
- Выявление сезонной изменчивости экстремального волнения;
- Построение и анализ роз ветров для случаев волнения 3 м и более, 5 м и более, 7 м и более;
- Определение преобладающих направлений волны.
- Анализ синоптических ситуаций для случаев с сильным волнением

Объект исследования — волнение над Баренцевым морем.

Предмет исследования — влияние синоптических процессов на появление сильного волнения.

Глава 1. Физико-географическое положение и климатические особенности Баренцева моря

1.1. Общие сведения о районе исследования

Баренцево море представляет собой окраинное море Северного Ледовитого океана, расположенное между северным побережьем Европы и арктическими архипелагами. Оно занимает обширную акваторию площадью около 1 424 000 квадратных километров, что делает его одним из крупнейших морей Арктического бассейна. На севере море ограничено архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, на востоке - Новой Землей, на юге - побережьем Кольского полуострова и Северной Норвегии, а на западе - условной линией, соединяющей мыс Нордкап с южной оконечностью Шпицбергена.[1]



Рисунок 1.1 – Акватория Баренцева моря на карте.

Гидрографические характеристики моря отличаются сложностью. Средняя глубина составляет 230 метров, при этом максимальная глубина достигает 600 метров во впадине юго-западной части. Соленость вод варьируется от 32 ‰ на юго-западе до 35 ‰ в центральной части.[2]

Море имеет важные гидрологические связи с соседними акваториями. С Норвежским морем оно соединяется через пролив между Норвегией и Медвежьим островом шириной около 200 км, а также через пролив между Шпицбергом и Землей Франца-Иосифа. С Карским морем связь осуществляется через пролив Карские Ворота шириной 50 км и пролив между Новой Землей и Землей Франца-Иосифа. С Белым морем Баренцево море соединяется через Горло Белого моря шириной 40-50 км.[2]

1.2. Климатический анализ Баренцева моря

Климат Баренцева моря характеризуется как субарктический морской с выраженным арктическим влиянием в северных районах. Его уникальность обусловлена взаимодействием двух основных факторов: поступлением теплых атлантических вод через Норвежское течение и влиянием арктических воздушных масс с холодными водами из Северного Ледовитого океана.[3]

Температурный режим отличается значительными сезонными вариациями. Зимой (январь-февраль) температура воздуха колеблется от -5...-10°C на юго-западе до -20...-25°C на северо-востоке. Летом (июль-август) в южных районах отмечаются температуры +7...+10°C, в центральных +3...+5°C, а в северных - около 0...+2°C. Температура поверхностного слоя воды зимой варьирует от +3°C на юго-западе до -1,8°C на северо-востоке, летом достигая +8°C на юге и +1°C на севере. Глубинные воды ниже 100 метров сохраняют стабильную температуру около 0...+2°C. [3]

Ледовый режим демонстрирует ярко выраженную пространственную и временную изменчивость. Юго-западная часть практически не замерзает

благодаря теплому Норвежскому течению. В центральных районах ледовый покров устанавливается с ноября по май при толщине льда 0,8-1,2 метра. Северо-восточные районы характеризуются наличием льдов толщиной до 2-3 метров. Сезонная динамика показывает начало ледообразования в октябре-ноябре, максимальное распространение льдов в марте-апреле и начало таяния в мае-июне.[3]

Атмосферные явления в регионе характеризуются годовым количеством осадков 300-600 мм с максимумом в западной части (до 800 мм) и минимумом на востоке (250-300 мм). Преобладающими формами осадков с октября по май является снег. Ветровой режим отличается преобладанием юго-западных и северо-восточных направлений со средней скоростью 5-8 м/с. Штормы с ветром более 20 м/с наблюдаются 20-40 дней в году, особенно зимой. Туманность составляет 40-80 дней в году с максимумом летом.[3]

Океанографические особенности включают систему течений. Теплые течения представлены Норвежским (ветвь Гольфстрима) с температурой +3...+5°C и Мурманским (+1...+3°C). Холодные течения включают Восточно-Исландское течение. Линия схождения течений проходит примерно по 74° северной широты. Водные массы разделяются на поверхностную арктическую (0-50 м, -1,5...+4°C), промежуточную атлантическую (50-200 м, +1...+4°C) и глубинную (более 200 м, -0,5...+1°C). [3]

Экологическое и хозяйственное значение Баренцева моря трудно переоценить. Это одно из самых продуктивных морей Арктики, имеющее важные промысловые ресурсы, включая треску, пикшу, мойву, сайду и камчатского краба. Оно служит ключевым районом нагула морских млекопитающих, таких как гренландский тюлень и белуха. В транспортном отношении море представляет собой важный участок Северного морского пути с крупными портами Мурманск (Россия) и Вардё (Норвегия). Минеральные

ресурсы включают шельфовые месторождения нефти и газа, а также придонные полезные ископаемые.[3]

В последние десятилетия наблюдаются значительные изменения в экосистеме Баренцева моря. Отмечается постепенное сокращение площади ледового покрова, увеличение температуры поверхностных вод (до 1,5°C за 30 лет) и изменение видового состава ихтиофауны с продвижением на север теплолюбивых видов. Эти процессы требуют постоянного мониторинга и научного изучения для понимания их долгосрочных последствий для экосистемы и хозяйственной деятельности в регионе.[3]

Глава 2. Характеристики волнения и методы их прогнозирования

2.1 Общие сведения

Морские волны представляют собой сложное физическое явление, возникающее в результате воздействия различных внешних факторов на водную поверхность. Основой для их образования служат уникальные физические свойства воды - её высокая подвижность, текучесть и способность передавать колебательные движения на значительные расстояния. Эти свойства обусловлены особенностями молекулярного строения воды и её реакцией на внешние воздействия.[4]

По происхождению морские волны можно разделить на несколько основных типов. Наиболее распространёнными являются ветровые волны, формирующиеся под действием воздушных потоков, движущихся над поверхностью моря. Их характеристики напрямую зависят от скорости ветра, его продолжительности и разгона - расстояния, на котором ветер воздействует на водную поверхность. Особый интерес представляют анемобарические волны (сейши), возникающие при резких изменениях атмосферного давления. Эти волны могут достигать значительной высоты даже при отсутствии сильного ветра. Сейсмические волны (цунами) генерируются тектоническими движениями дна и отличаются огромной длиной и энергией. Отдельную категорию составляют приливные волны, вызванные гравитационным влиянием Луны и Солнца, которые имеют строгую периодичность и охватывают всю толщу моря.[4]

Физические основы волнообразования включают два фундаментальных фактора. Гравитационное воздействие определяет возвращение возмущённой водной поверхности в равновесное состояние. Сила Кориолиса, связанная с вращением Земли, влияет на направление распространения волн, особенно заметно это проявляется у длинных волн, таких как приливные. Исключением

из этого правила являются капиллярные волны длиной в несколько сантиметров, где основную роль играет поверхностное натяжение воды. Однако такие волны не оказывают существенного влияния на крупномасштабные морские процессы и быстро затухают.[4]

Различные типы волн существенно отличаются по своим временным характеристикам. Ветровая рябь имеет период менее 1 секунды и быстро исчезает после прекращения ветра. Обычные ветровые волны характеризуются периодом до 30 секунд и могут сохраняться некоторое время после ослабления ветра. Сейши и цунами имеют период от нескольких минут до десятков минут, что связано с масштабами вызвавших их явлений. Приливные волны отличаются наибольшим периодом, измеряемым часами, что соответствует циклу приливо-отливных явлений.[4]

Особое значение уделяется ветровым волнам, которые играют ключевую роль в различных морских процессах. Их воздействие проявляется в нескольких аспектах. Во-первых, они обеспечивают вертикальное перемешивание водных масс, охватывая верхний 50-метровый слой. Этот процесс влияет на распределение температуры, солёности и растворённых газов, формируя условия для морских экосистем. Во-вторых, ветровые волны значительно усиливают испарительные процессы, увеличивая площадь испарения примерно на 5% по сравнению со спокойной поверхностью. При этом происходит перенос микроскопических кристаллов солей в атмосферу, которые становятся ядрами конденсации для образования облаков. В-третьих, существует сложное взаимодействие между волнами и атмосферой - возмущённая поверхность моря создаёт обратную связь с ветровыми потоками, генерируя дополнительные турбулентные пульсации. Наконец, нельзя недооценивать геоморфологическое воздействие волн, которое проявляется в разрушении береговой линии, транспортировке донных отложений и разрушении ледяного покрова в полярных регионах. По характеру взаимодействия с ветром различают три типа ветровых волн:

Вынужденные волны формируются и существуют под постоянным воздействием ветра.

Свободные волны (зыбь) продолжают распространяться после прекращения ветра или выхода из зоны его действия.

Смешанные волны представляют собой комбинацию этих двух типов, когда одновременно наблюдаются и волны, создаваемые местным ветром, и зыбь, пришедшая из других районов.

С пространственной точки зрения волны делятся на двухмерные (плоские), где движение частиц воды происходит в параллельных вертикальных плоскостях, и трёхмерные (пространственные), характеризующиеся более сложной траекторией движения частиц. Особый случай представляет интерференция волн - явление, возникающее при наложении нескольких волновых систем, которое может приводить как к усилению, так и к ослаблению волнового воздействия.

Для количественного описания волновых процессов используют комплекс параметров. Среди геометрических характеристик наиболее важными являются высота волны (вертикальное расстояние между гребнем и подошвой), длина волны (горизонтальное расстояние между соседними гребнями) и крутизна (отношение высоты к длине). Кинематические параметры включают период волны (время между прохождением последовательных гребней через фиксированную точку), скорость распространения и направление движения. Морфологическое описание волны (рисунок 2.1) включает такие элементы как гребень (часть волны выше среднего уровня), подошва (часть волны ниже среднего уровня) и вершина (наивысшая точка гребня). Эти параметры имеют важное практическое значение для прогнозирования волновой активности. [4]

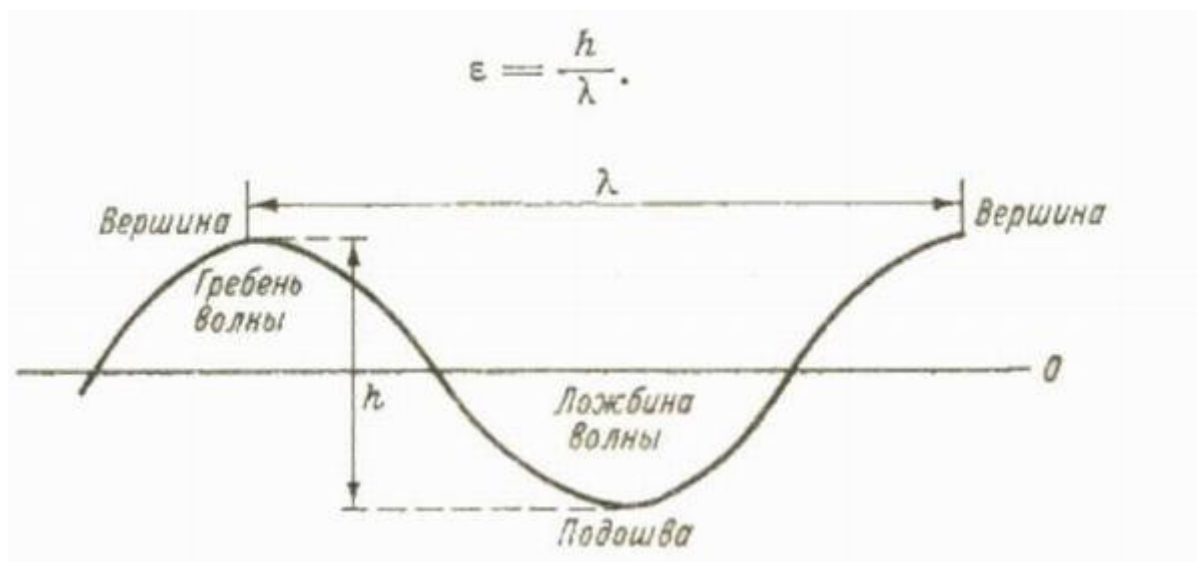


Рисунок 2.1 – Геометрические характеристики волны.

2.2 Численные модели прогноза волнения

Вместо предсказания каждой отдельной волны, модели работают с волновым спектром. Волновой спектр - это функция $F(f, \theta, x, y, t)$, которая описывает, как энергия волн распределена по периоду и направлению распространения волн в пространстве (x, y - координаты) во времени (t).

Уравнение баланса спектральной плотности энергии. Это фундаментальное уравнение, описывающее, как спектр изменяется во времени и пространстве под действием физических процессов:

- Генерация. Передача энергии от ветра волнам.
- Нелинейные взаимодействия. Обмен энергией между волнами разных частот и направлений.
- Диссипация. Потери энергии, в основном за счет "обрушения", но также трения о дно на мелководье.
- Распространение. Перенос волновой энергии (групп волн) по морю (адвекция).

Уравнение баланса решается численно на пространственно-временной сетке, покрывающей весь регион. Для этого используются методы конечных

разностей или спектральные методы. Расчеты требуют огромных вычислительных ресурсов.

Наиболее известные численные модели по волнению:

Спектральные модели третьего поколения. Самые современные и точные. Они напрямую решают уравнение баланса, используя наиболее продвинутые физические параметризации для всех процессов (ветрового вклада, нелинейных взаимодействий, диссипации). Примеры:

- WAVEWATCH III (WW3) – разработанная NOAA (США), применяется для прогноза волнения в открытом океане и морях, включая Арктику.
- SWAN– ориентирована на прибрежные зоны и мелководные районы, учитывает рефракцию, дифракцию и донное трение.
- ECWMF (ERA5, IFS) – интегрированная система прогноза погоды и волнения Европейского центра среднесрочных прогнозов, используемая в реанализе ERA5.

Модели второго поколения. Они использовали параметризованные формы спектра или упрощенные схемы для нелинейных взаимодействий. Сейчас в основном вытеснены моделями третьего поколения из-за их большей точности и физической обоснованности. [6]

2.3 Критерии сильного волнения в Баренцевом море

Высота волн 3% обеспеченности ($H_{3\%}$) — это характеристика интенсивности волнения, которая соответствует высоте одной наиболее крупной из десяти волн.

В зарубежных массивах пользуется характеристикой значительной высоты волн или высоты волны 13% обеспеченности (H_s).

Значительная высота волн (H_s) — это средняя высота одной трети наиболее крупных волн в определённом районе в конкретное время.

Связь между этими высотами согласно Руководству РД 52.10.865 – 2017 [7] следующая: $H_{3\%}=1.32 \cdot H_s$. То есть высота волн 3% обеспеченности примерно на 30% больше значительной высоты волны.

В таблице 2.1 приведены значения высоты волны 3% обеспеченности ($H_{3\%}$).

Таблица 2.1 – Шкала степени волнения моря

Высота волны от (м)	Высота волны до (м)	Балл	Характеристика волнения
—	—	0	Отсутствует
0	0,25	1	Слабое
0,25	0,75	2	Умеренное
0,75	1,25	3	Значительное
1,25	2,0	4	Значительное
2,0	3,5	5	Сильное
3,5	6,0	6	Сильное
6,0	8,5	7	Очень сильное
8,5	11,0	8	Очень сильное
11,0	11,5 и более	9	Исключительное

Таким образом, для Баренцева моря порогом "сильного волнения" считается высота волн от 2 до 6 метров.

В прогнозах часто используется описательная шкала состояния моря. Для сильного волнения это соответствует следующему описанию: море бурное, высокие волны (гребни волн начинают опрокидываться, образуя пену, которую ветер срывает и развеивает). Видимость может ухудшаться из-за брызг.

По критериям опасных гидрометеорологических явлений согласно руководству [8] сильным волнением называется высота волн не менее 4 м в прибрежной зоне, не менее 6 м в открытом море, не менее 8 м в открытом океане. Значения указаны для высот волн $H_{3\%}$. Для H_s критерии будут соответствовать в прибрежной зоне около 3 м, в открытом море – около 5 м и в открытом океане – около 7 м.

Волны в Баренцевом море образуются в результате сложного взаимодействия различных атмосферных факторов, которые приводят к возникновению волнений на поверхности воды. Эти факторы включают влияние ветров, атмосферных фронтов, а также местные метеорологические особенности. Анализ этих условий имеет большое значение для понимания причин возникновения волнений и для разработки эффективных методов прогнозирования. Одной из основных причин волнения на море является ветер. Ускорение потоков воздуха над поверхностью воды создает трение, что приводит к образованию волн. Чем сильнее ветер и чем дольше он дует в одном направлении, тем выше будет волнение. В Баренцевом море, где часто наблюдаются мощные и стабильные ветры, это влияние становится особенно выраженным. Например, юго-западные и северо-западные ветры, как правило, менее стабильны, но также могут вызывать существенное волнение, если имеют значительные скорости.

Ветер также играет роль в накапливании энергии волн: когда ветер дует над уже существующими волнами, он может увеличить их высоту и длину. Это явление часто наблюдается во время штормов, когда продолжительные и сильные ветры создают массивные волны, что представляет собой значительную опасность для морского судоходства и рыбного хозяйства. Важно отметить, что в день предстоящего возникновения сильного волнения на Баренцевом море именно ветровые условия остаются главной причиной деформации морской поверхности. [9]

Атмосферные фронты также являются важным фактором, способствующим возникновению волнений. Фронты формируются на границе между различными воздушными массами, которые имеют разные температуры и влажность. Когда холодный фронт встречается с теплым, возникают мощные конвективные процессы, которые вызывают сильные ветры и, как следствие, волнения. Холодный фронт, движущийся с более высокой скоростью, может вызвать резкие изменения в метеорологических условиях, способствуя формирования сильных волн на море. [10]

Помимо холодных фронтов, теплые фронты также могут вызывать волнения, хотя и с меньшей интенсивностью. В таких случаях характеристики волн могут быть иными, потому что теплые фронты ассоциируются с устойчивыми и менее турбулентными условиями. Однако в моменты, когда теплые потоки накладываются на нестабильные холодные массы воздуха, возникают густые облака и осадки, что, в свою очередь, также может привести к повышению уровней волн.

Ключевые особенности Баренцева моря, усугубляющие опасность волнения:

- Из-за относительно ограниченных размеров акватории (по сравнению с океаном) и сложного рельефа дна (впадины) в Баренцевом море часто формируется короткая, крутая волна с острыми гребнями. Такая волна гораздо опаснее для судов, чем длинная пологая океанская волна той же высоты. Она вызывает сильную и резкую качку.
- Попадание ледяной воды на палубу создает экстремальные условия для людей и повышает риск обледенения судна.
- Наличие кромки льда, айсбергов или дрейфующих льдин на фоне сильного волнения создает дополнительные риски столкновения и повреждения корпуса.

- Влияние теплого Нордкапского течения и холодных арктических вод создает зоны с резкими перепадами температур и может влиять на формирование волн.

- Частые туманы в сочетании с сильным волнением крайне опасны для навигации.

Волнение от 2.5 м уже требует повышенного внимания экипажа, может вызывать замедление хода, слеминг (удары волн в носовую часть), заливание палубы. При высоте волны 4 м и выше многие суда вынуждены искать укрытие или менять курс, возрастает риск повреждений, смещения груза, травм. Рыболовные суда часто прекращают работу. Любые работы на платформах, буровых, прокладка трубопроводов приостанавливаются уже при умеренном-сильном волнении. Сильное и очень сильное волнение делает операции невозможными и опасными. Также, сильное волнение приводит к разрушению берегов, затруднению захода судов в порты, возможным подтоплениям низменных участков побережья во время штормовых нагонов.

Глава 3. Общая характеристика по режиму волнения Баренцева моря.

Анализ синоптических условий при сильном волнении.

В качестве исходных данных для анализа сильного волнения в Баренцевом море были выбраны данные по значительной высотой волны из реанализа ERA5 в период с 2000 по 2024 гг. Данные представлены в узлах широтно-долготной сетки с шагом 0,5°.

3.1. Анализ повторяемости волнения над акваторией Баренцева моря

Построены поля повторяемости волнения 3 м и более; 5 м и более (рисунки 3.1-3.24). Значения выбраны из расчета критериев сильного волнения как опасного в соответствии с руководством [9]. 3 м значительной высоты волны соответствует 4м высоте волн 3% обеспеченности, что относится к опасным явлениям в прибрежной зоне, и 5 м значительной высоты примерно соответствуют 6 м 3% обеспеченности, такая высота считается опасной в открытом море.

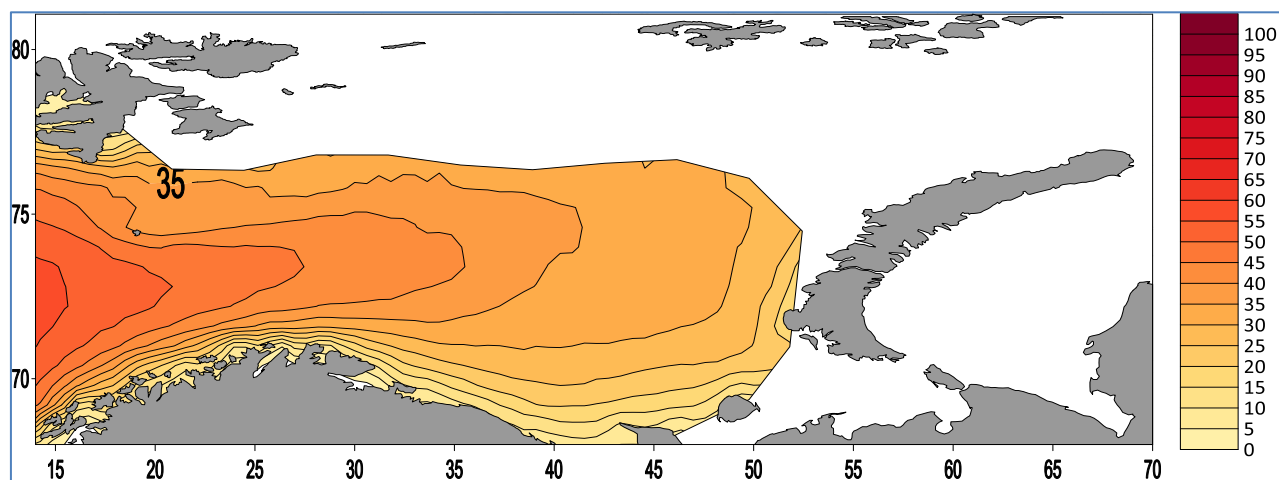


Рисунок 3.1. – Повторяемость волнения 3 метра и более в Баренцевом море за январь, %.

В январе (рисунок 3.1) максимальная активность волнения наблюдается в западной (до 50%) и центральной (30%) частях моря. В этот период особенно активны атлантические циклоны, приносящие сильные ветра. Частота волнения

достигает пиковых значений из-за максимального контраста температур между теплыми атлантическими массами и холодным арктическим воздухом.

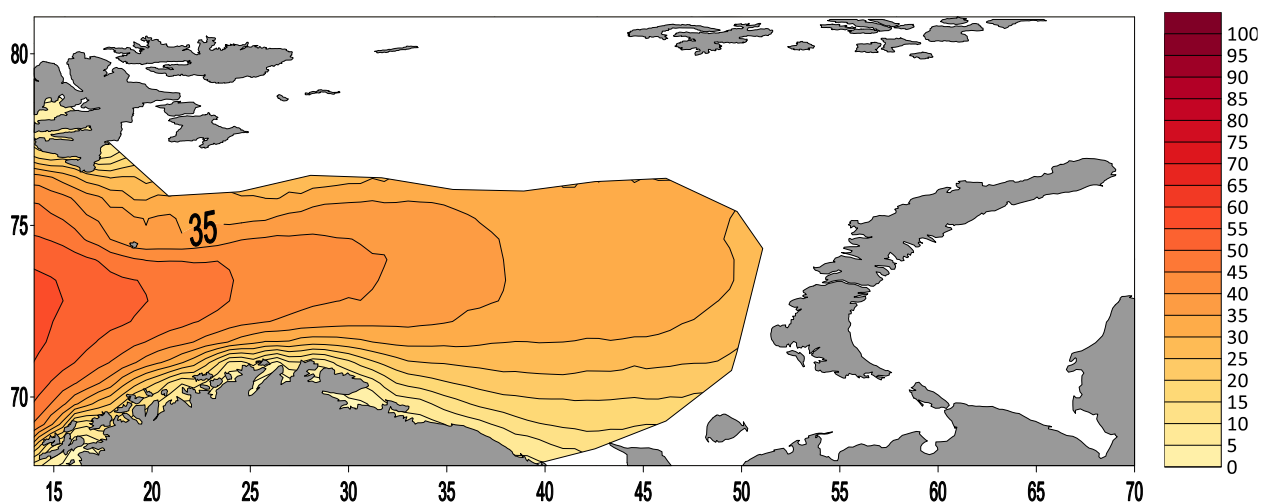


Рисунок 3.2 – Повторяемость волнения 3 метра и более в Баренцевом море за февраль, %.

В феврале (рисунок 3.2) сохраняется высокая повторяемость в открытых частях моря до 45%. Отмечается некоторое снижение активности по сравнению с январем. Постепенная стабилизация атмосферных процессов, хотя циклоническая деятельность остается интенсивной.

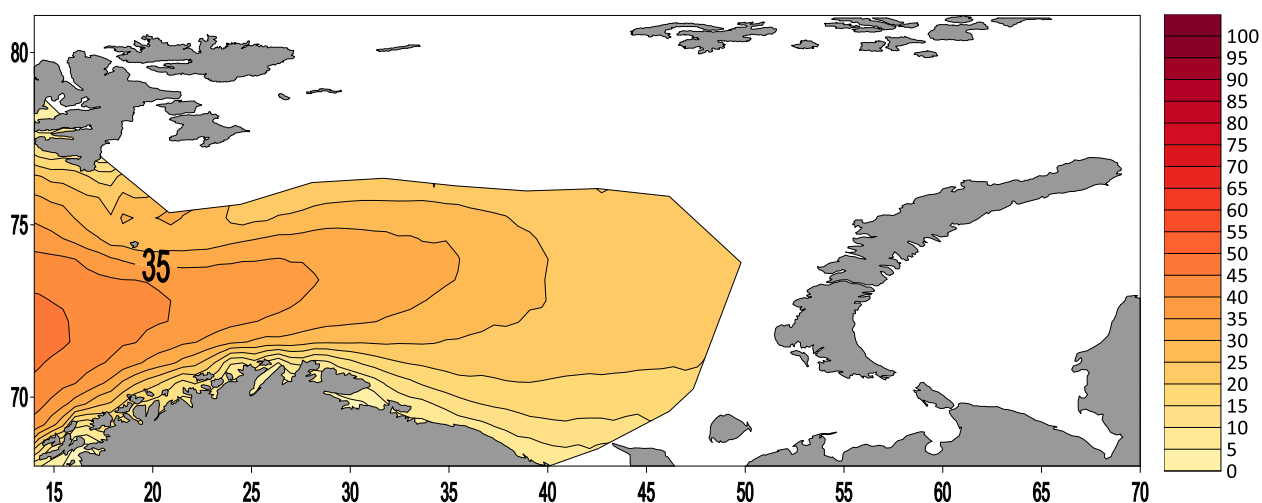


Рисунок 3.3 – Повторяемость волнения 3 метра и более в Баренцевом море за март, %.

В марте (рисунок 3.3) начинается заметное снижение частоты высокого волнения, однако западные районы все еще подвержены сильному волнению (до 40%).

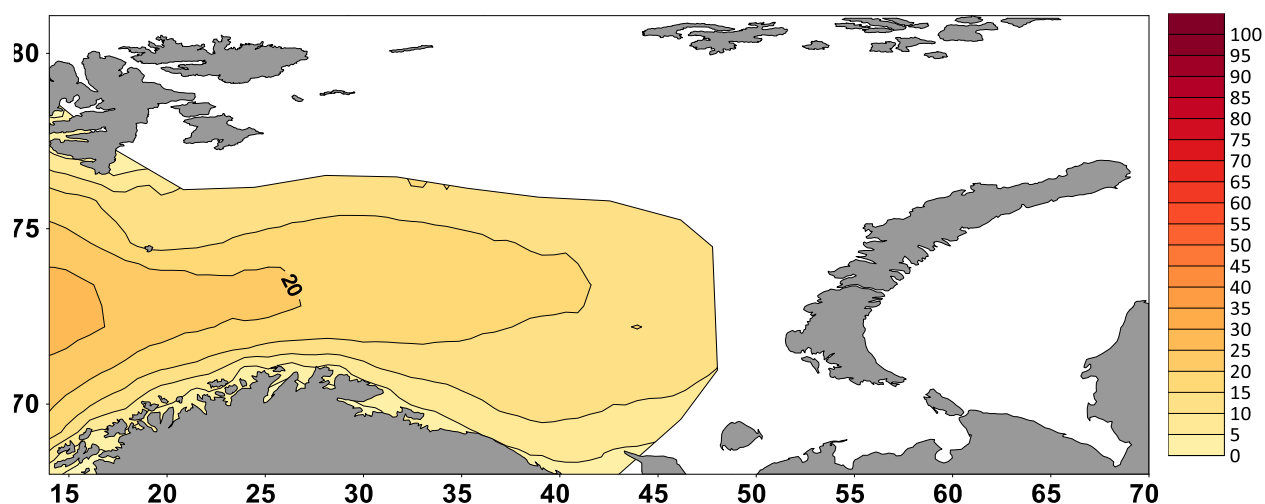


Рисунок 3.4 – Повторяемость волнения 3 метра и более в Баренцевом море за апрель, %.

В апреле (рисунок 3.4) видно резкое снижение повторяемости волнения заданной градации до 20%, с максимумом также в западной части акватории. Происходит ослабление циклонической активности, начало сезонного потепления.

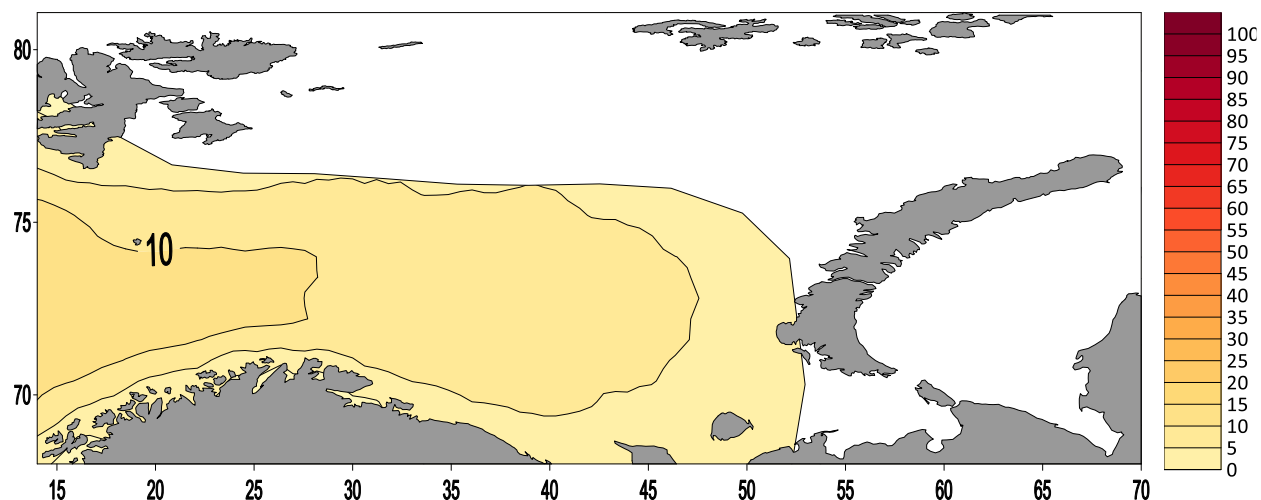


Рисунок 3.5 – Повторяемость волнения 3 метра и более в Баренцевом море за май, %.

В мае (рисунок 3.5) волнение 3 метра и более становится редким явлением (до 10%). Это связано с установлением устойчивой весенней погоды и уменьшением ветровой активности.

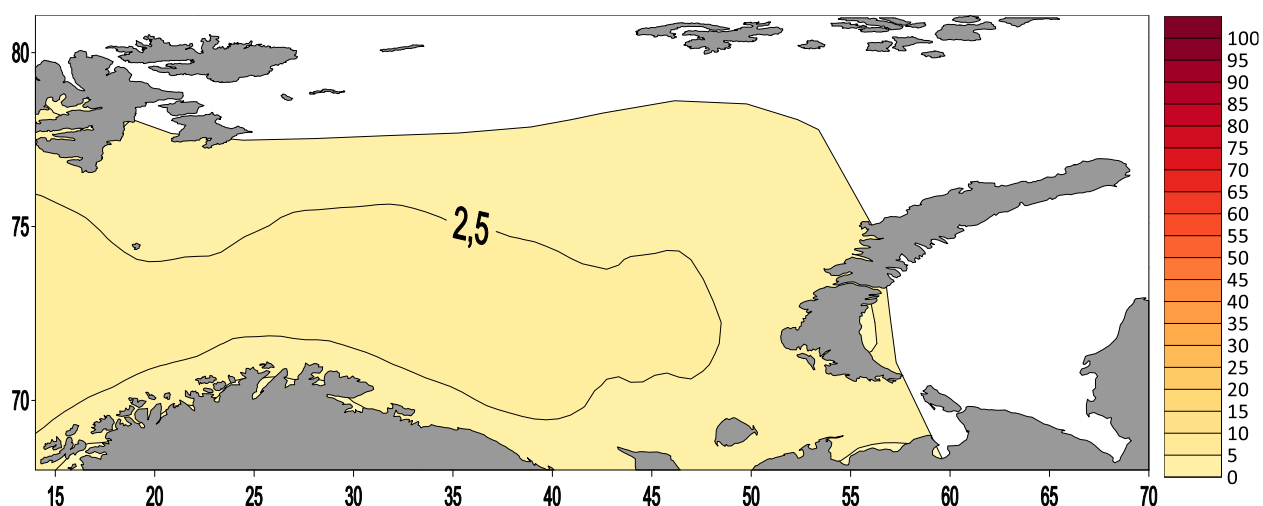


Рисунок 3.6 – Повторяемость волнения 3 метра и более в Баренцевом море за июнь, %.

В июне (рисунок 3.6) отдельные случаи сильного волнения связаны с прохождением редких циклонов. Преобладание слабых ветров и устойчивой стратификации атмосферы.

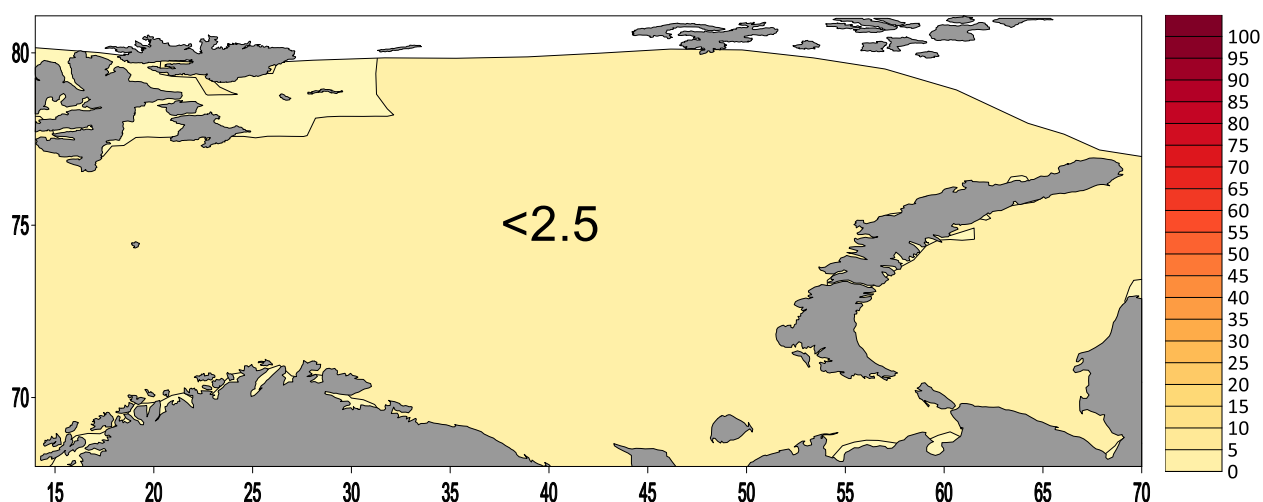


Рисунок 3.7 – Повторяемость волнения 3 метра и более в Баренцевом море за июль, %.

В июле (рисунок 3.7) самые низкие показатели за год. Максимальный прогрев водной поверхности снижает ветровую активность

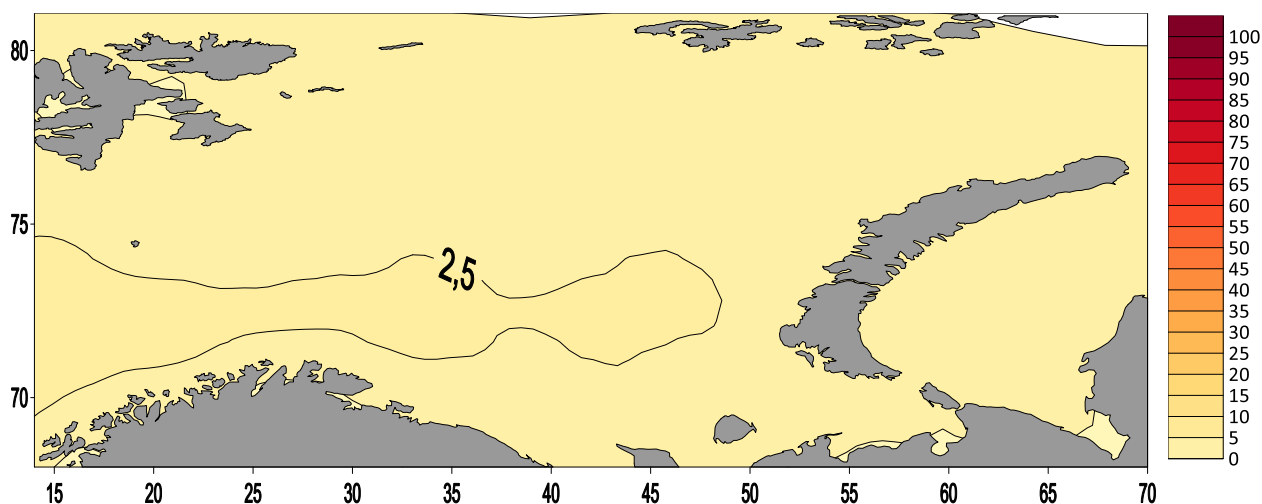


Рисунок 3.8 – Повторяемость волнения 3 метра и более в Баренцевом море за август, %.

В августе (рисунок 3.8) начинается постепенный рост волновой активности. В конце месяца возможны первые осенние шторма, что является первыми признаками сезонного увеличения циклонической деятельности.

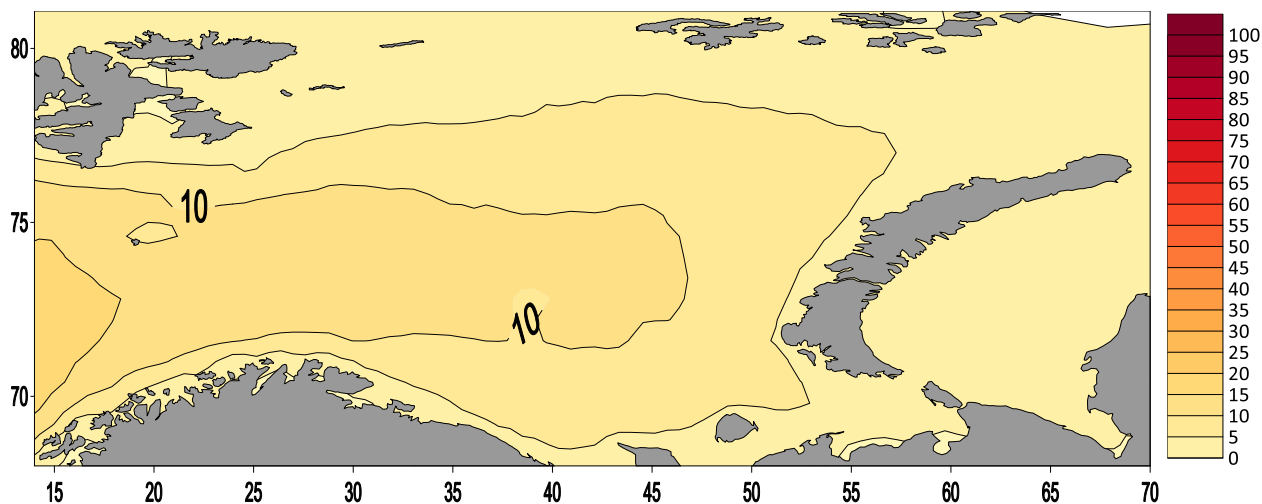


Рисунок 3.9 – Повторяемость волнения 3 метра и более в Баренцевом море за сентябрь, %.

В сентябре (рисунок 3.9) происходит заметное увеличение повторяемости сильного волнения (до 10%). Активизация атлантических циклонов. Начало осеннего штормового сезона, усиление ветровой активности.

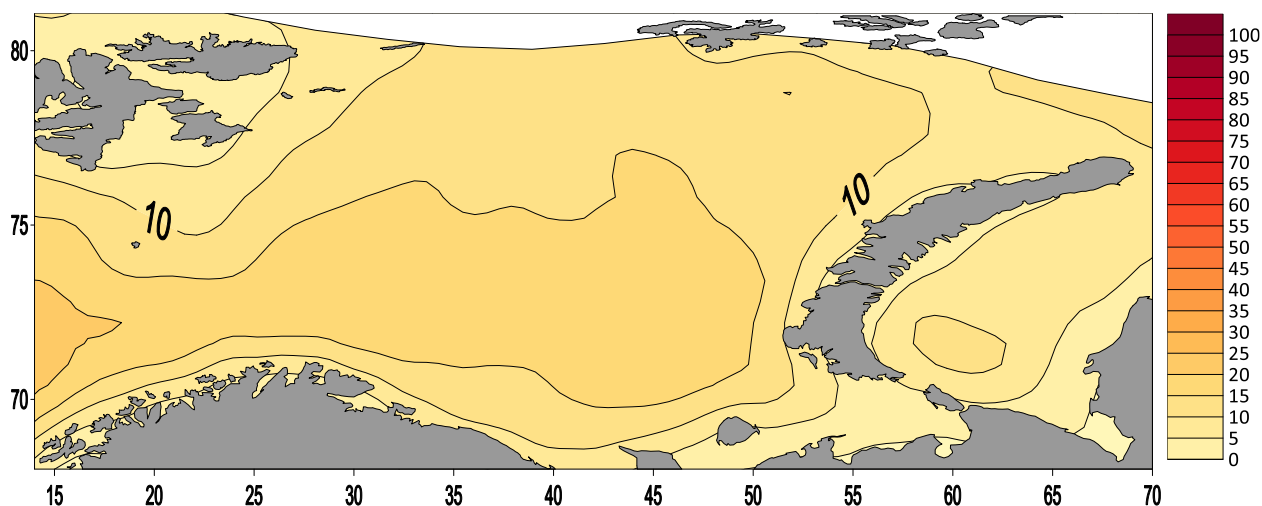


Рисунок 3.10 – Повторяемость волнения 3 метра и более в Баренцевом море за октябрь, %.

В октябре (рисунок 3.10) высоты волн увеличиваются в западных районах моря и доходит до 20%. Это происходит из-за увеличения температурных контрастов и усиления циклонов.

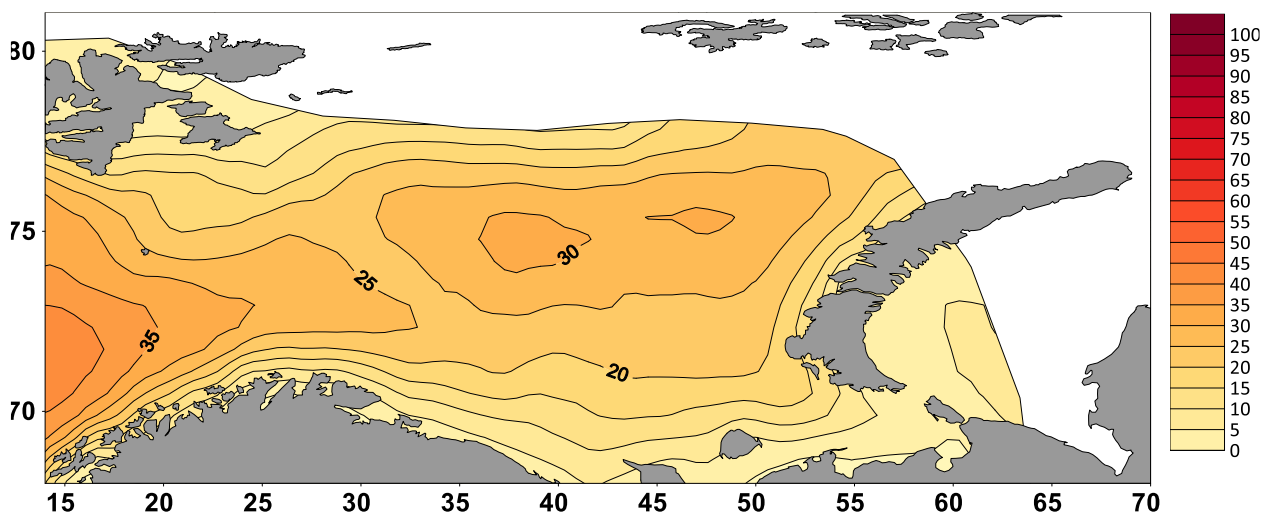


Рисунок 3.11 – Повторяемость волнения 3 метра и более в Баренцевом море за ноябрь, %.

В ноябре (рисунок 3.11) происходит выход на зимние показатели повторяемости. Максимальные значения в открытой части моря достигают 30%. Устанавливается зимний режим циркуляции атмосферы.

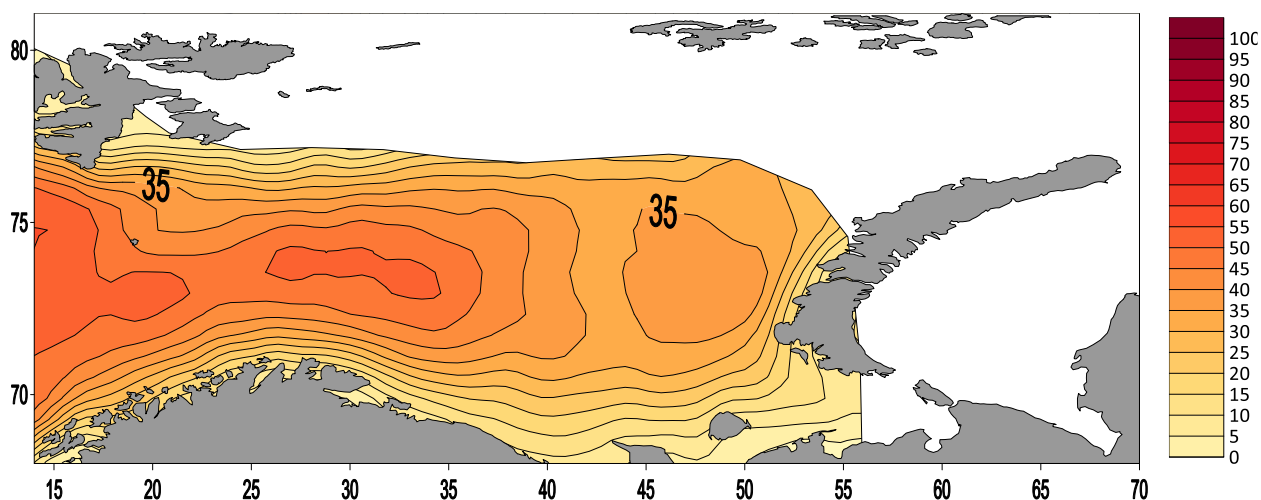


Рисунок 3.12 – Повторяемость волнения 3 метра и более в Баренцевом море за декабрь, %.

В декабре (рисунок 3.12) заметны пиковые значения повторяемости волнения более 3 метров. Особенно сильная активность в районах, открытых для атлантических ветров (до 55%). Это происходит из-за максимального развития циклонической деятельности в сочетании с зимним охлаждением.

В западных районах Баренцева моря максимальные значения повторяемости волны более 3 метров наблюдается во все сезоны. В центральной части – в холодный период. В восточной акватории – минимальная активность, особенно летом.

Зимний максимум связан с активностью атлантических циклонов, которые приносят сильные ветра (15–20 м/с), большими барическими градиентами, а также отсутствием льда в западной части благодаря Гольфстриму, что позволяет волнам свободно развиваться.

Летний минимум объясняется ослаблением циклонов и преобладанием антициклональной погоды, а также снижением ветровой активности из-за меньших температурных контрастов.

В январе (рисунок 3.13) волнение достигает повторяемости 10% в западной и 5% в центральной частях моря.

В феврале (рисунок 3.14) ситуация схожа с январем.

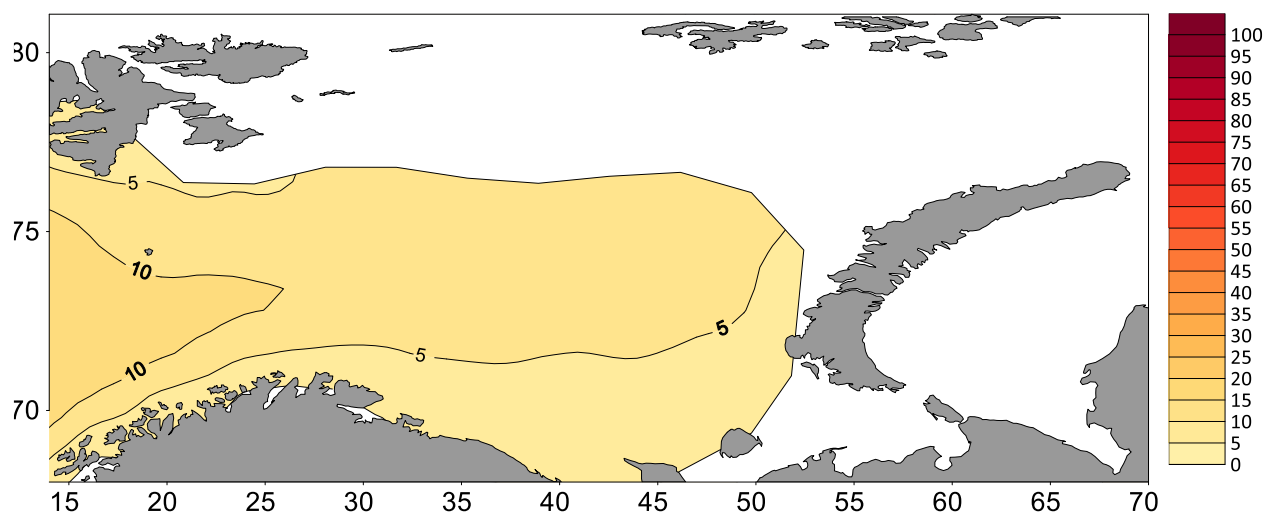


Рисунок 3.13 – Повторяемость волнения 5 метра и более в Баренцевом море за январь, %.

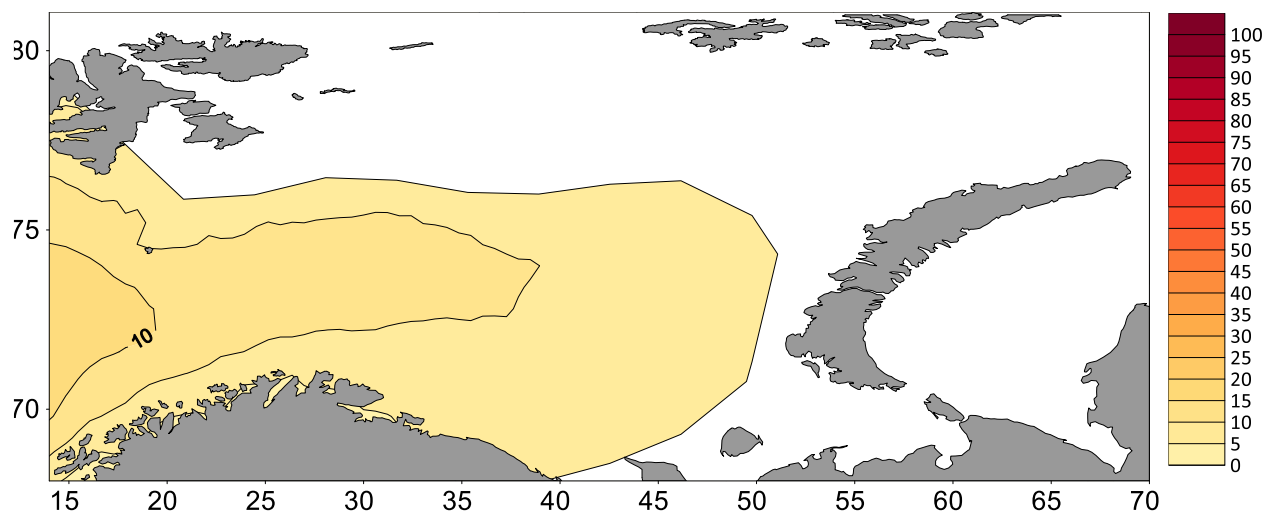


Рисунок 3.14 – Повторяемость волнения 5 метра и более в Баренцевом море за февраль, %.

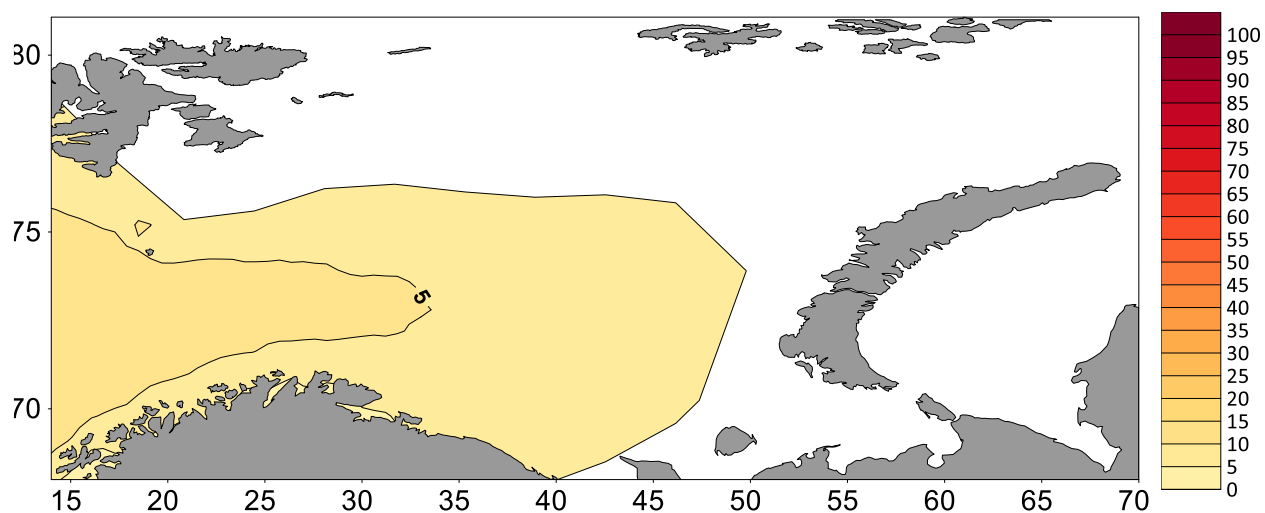


Рисунок 3.15 – Повторяемость волнения 5 метра и более в Баренцевом море за март, %.

В марте (рисунок 3.15) виден небольшой спад активности волнения до повторяемости 5%.

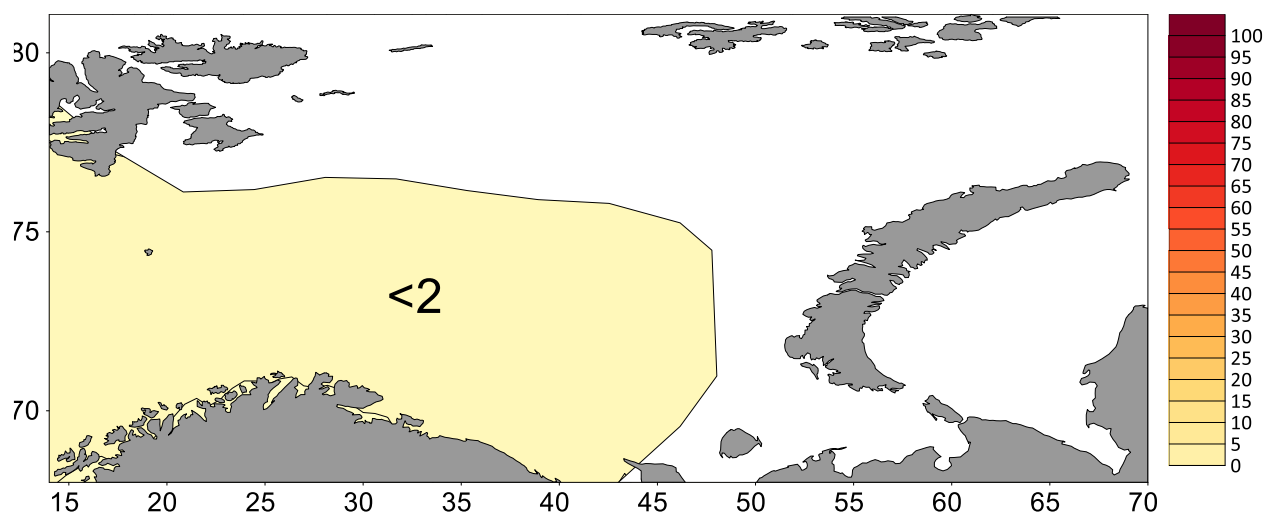


Рисунок 3.16 – Повторяемость волнения 5 метра и более в Баренцевом море за апрель, %.

В апреле (рисунок 3.16) происходит уменьшение повторяемости волнения 5 м и более и составляет менее 2% по всей акватории моря.

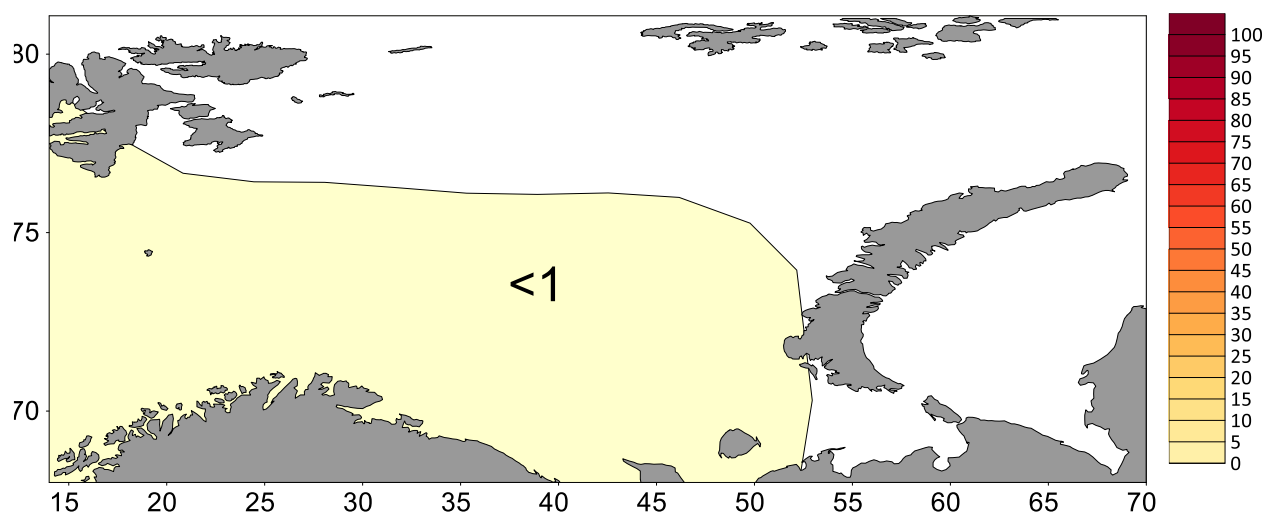


Рисунок 3.17 – Повторяемость волнения 5 метра и более в Баренцевом море за май, %.

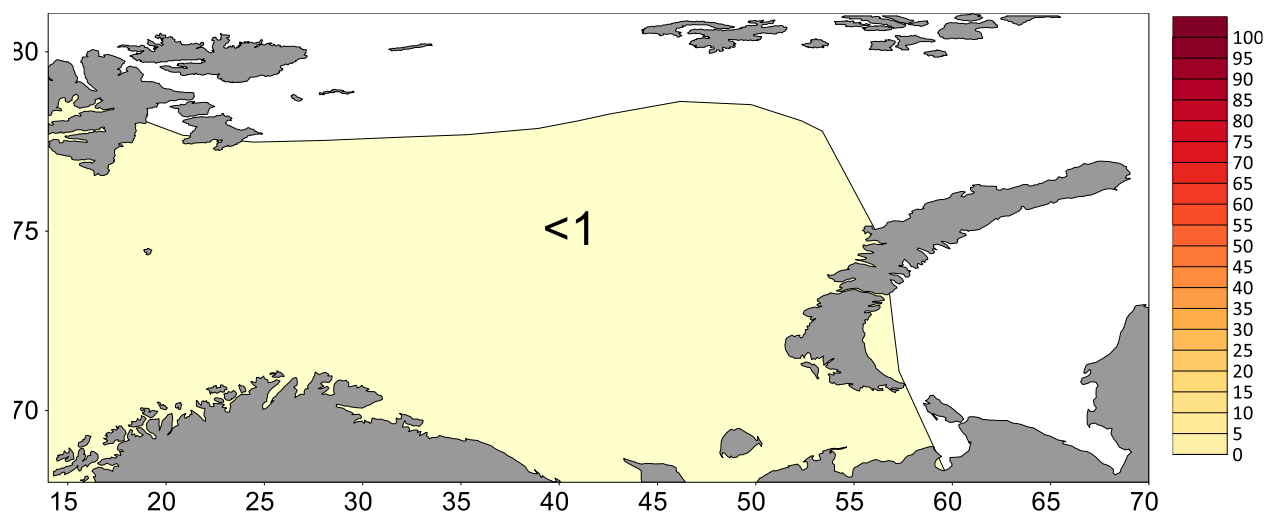


Рисунок 3.18 – Повторяемость волнения 5 метра и более в Баренцевом море за июнь, %.

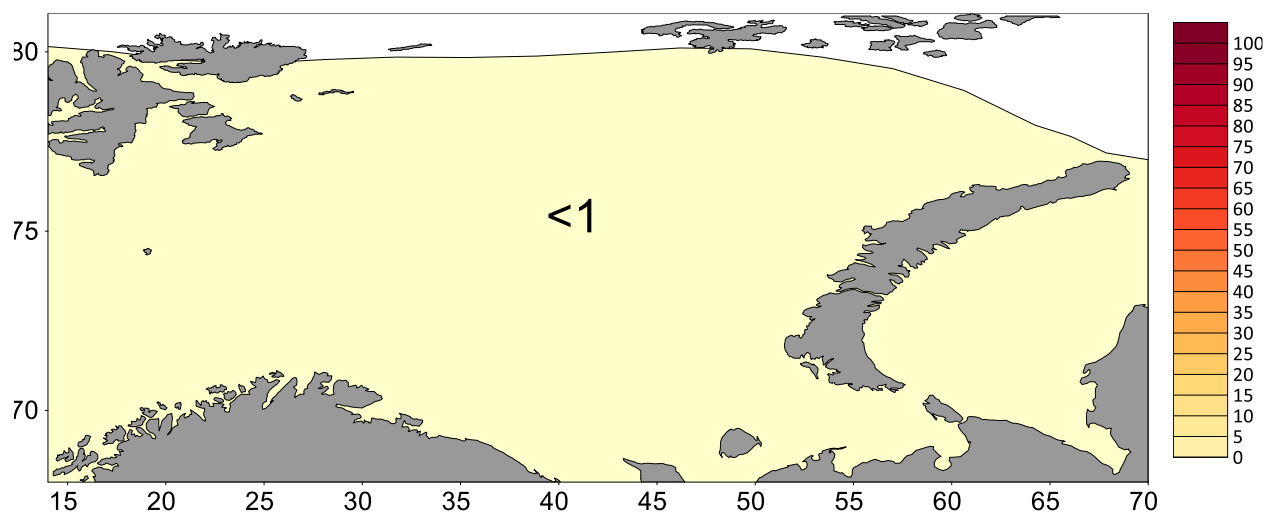


Рисунок 3.19 – Повторяемость волнения 5 метра и более в Баренцевом море за июль, %.

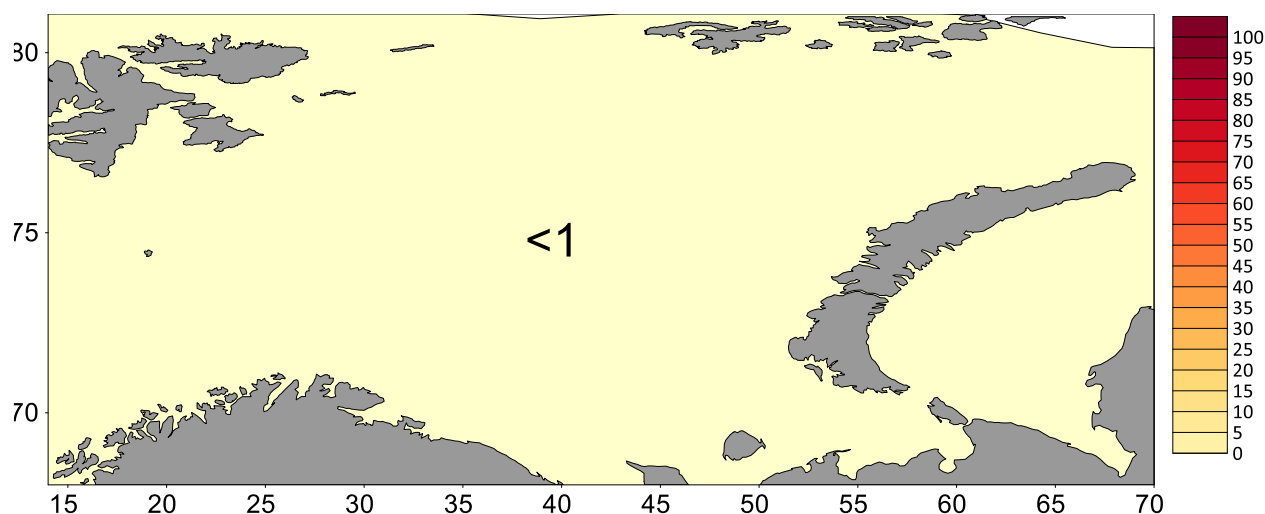


Рисунок 3.20 – Повторяемость волнения 5 метра и более в Баренцевом море за август, %.

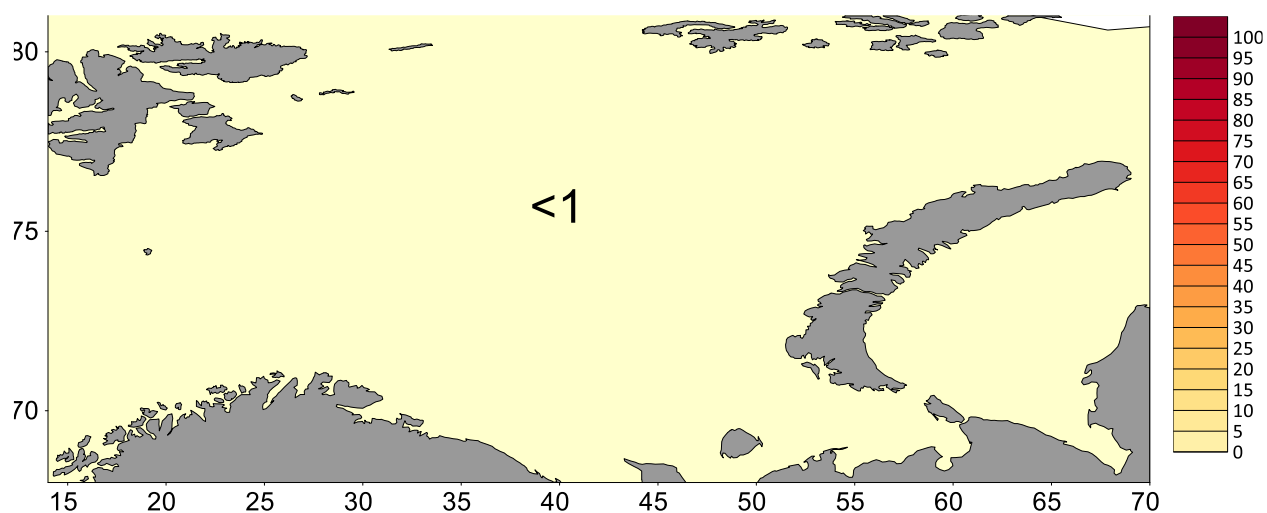


Рисунок 3.21 – Повторяемость волнения 5 метра и более в Баренцевом море за сентябрь, %.

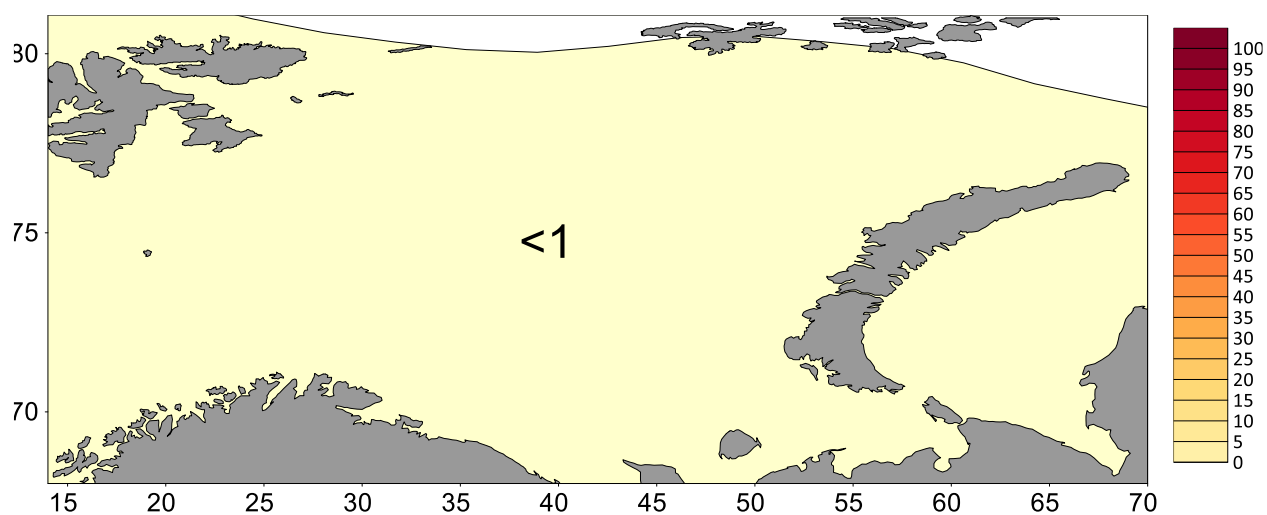


Рисунок 3.22 – Повторяемость волнения 5 метра и более в Баренцевом море за октябрь, %.

С мая по октябрь (рисунок 3.17 – 3.22) волнение 5 и более метров встречалось редко (менее 1%).

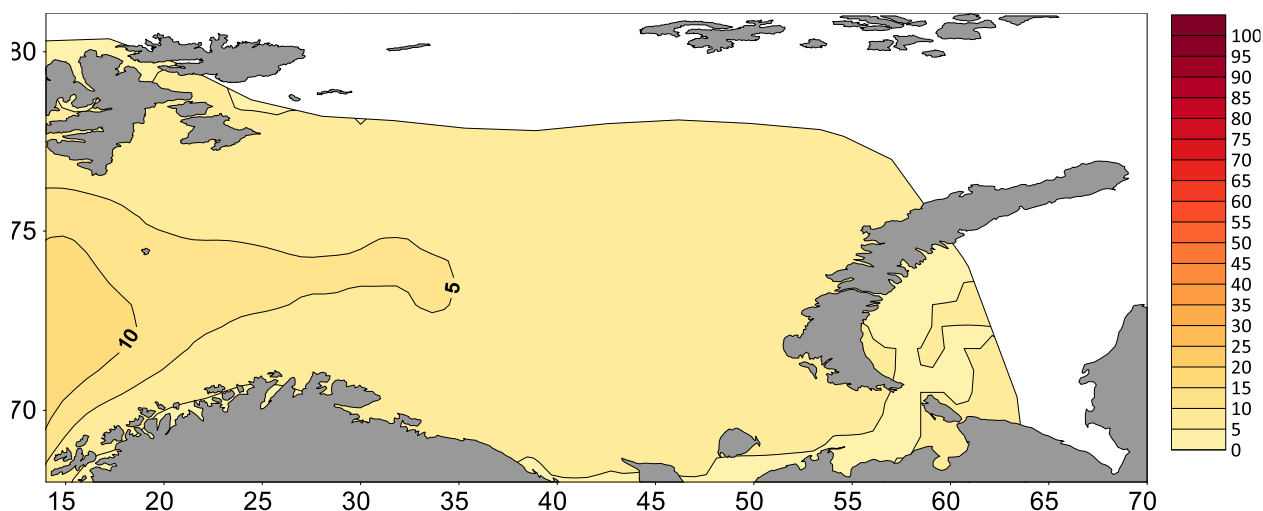


Рисунок 3.23 – Повторяемость волнения 5 метра и более в Баренцевом море за ноябрь, %.

В ноябре (рисунок 3.23) видно увеличение повторяемости волнения 5 м и более до 5% в открытых частях моря.

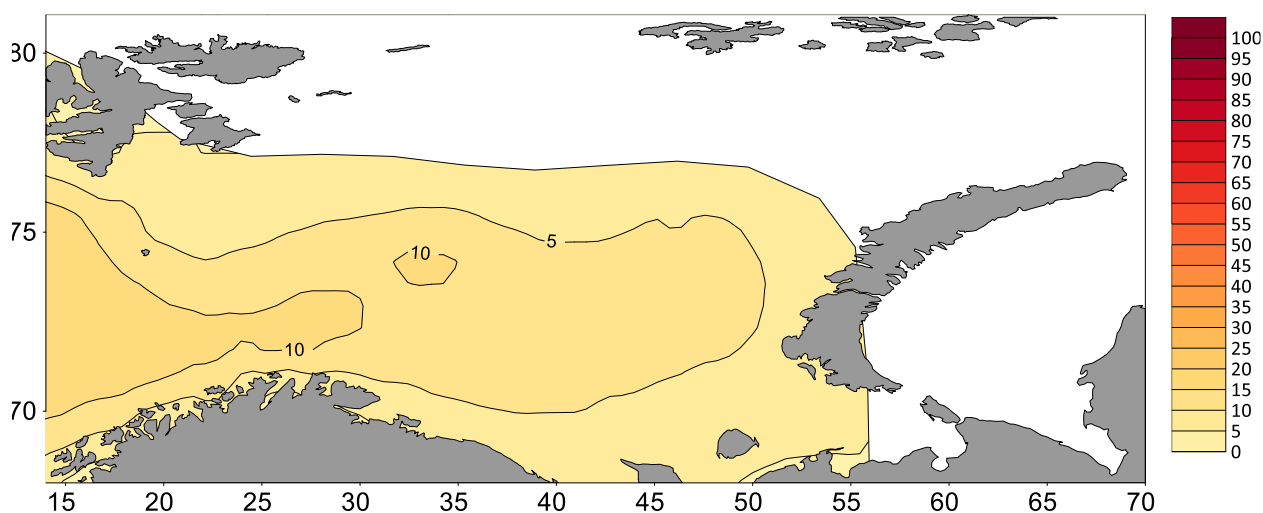


Рисунок 3.24 – Повторяемость волнения 5 метра и более в Баренцевом море за декабрь, %.

В декабре (рисунок 3.24) повторяемость волнения не превышает 10%.

3.2. Годовой ход повторяемости волнения по месяцам

Построены графики повторяемости волнения по месяцам для трех районов Баренцева моря в период с 2000 по 2024 гг. Районирование акватории выполнено согласно Регистру ветра и волнения (рисунок 3.25) [5].



Рисунок 3.25 – Районирование акватории Баренцева моря [2]

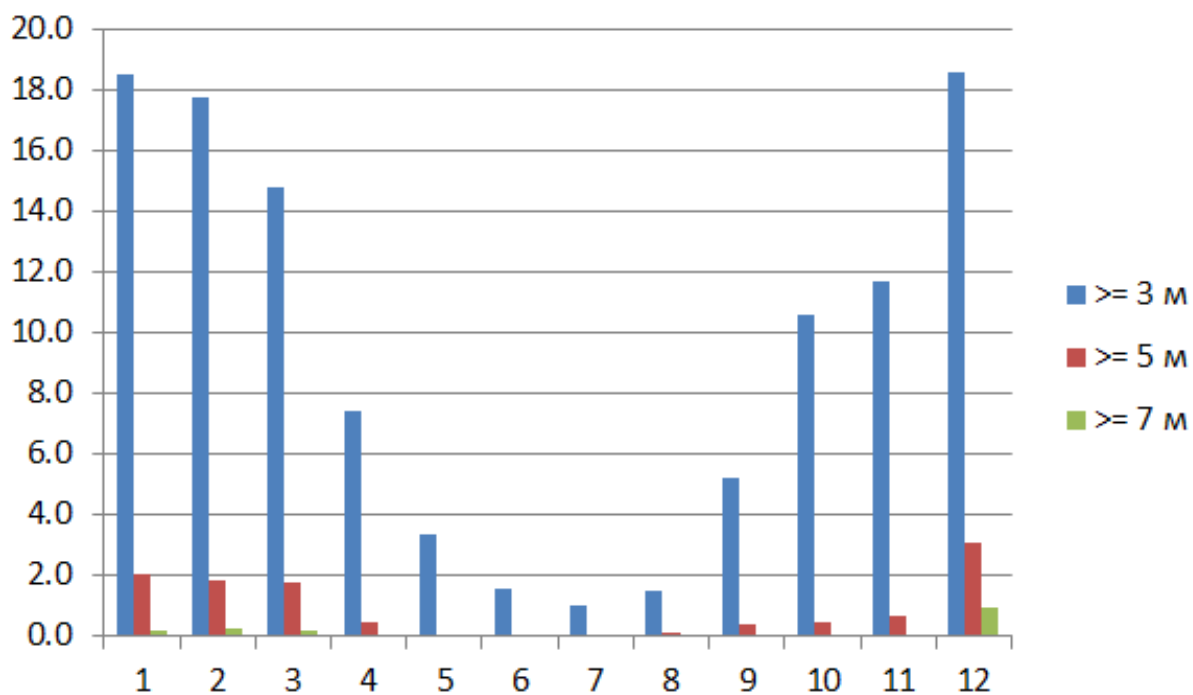


Рисунок 3.26 – Повторяемость высоты волны по месяцам для района 1.

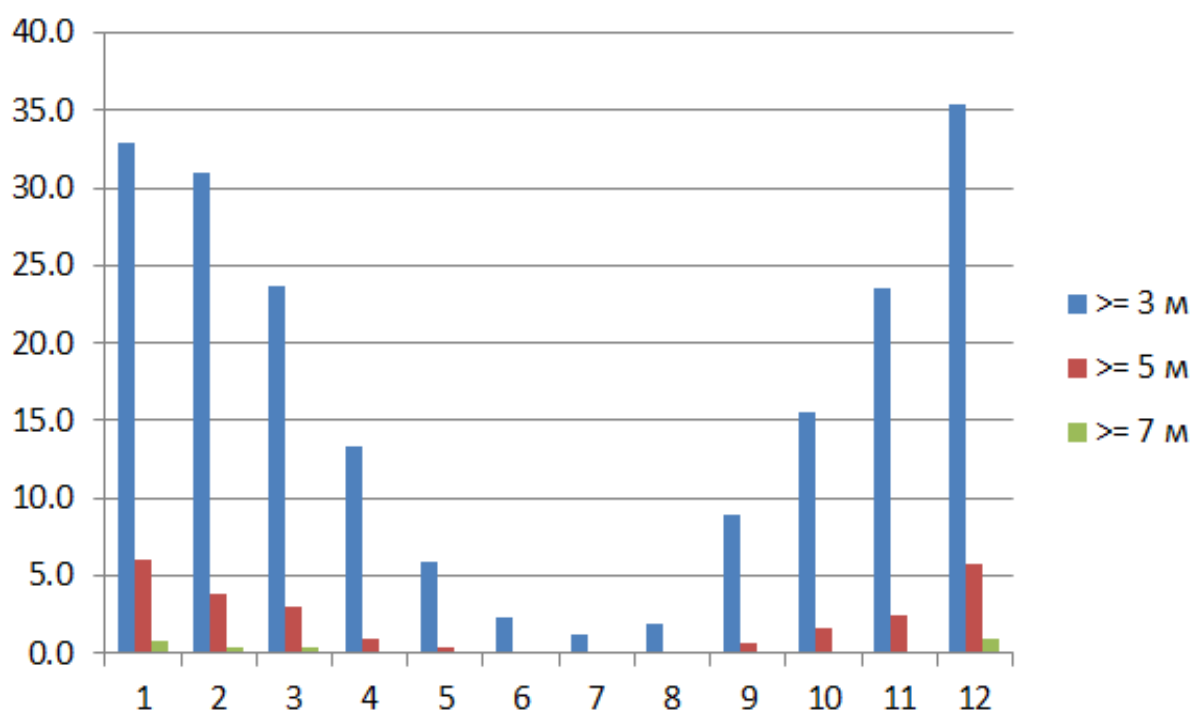


Рисунок 3.27 – Повторяемость высоты волны по месяцам для района 2.

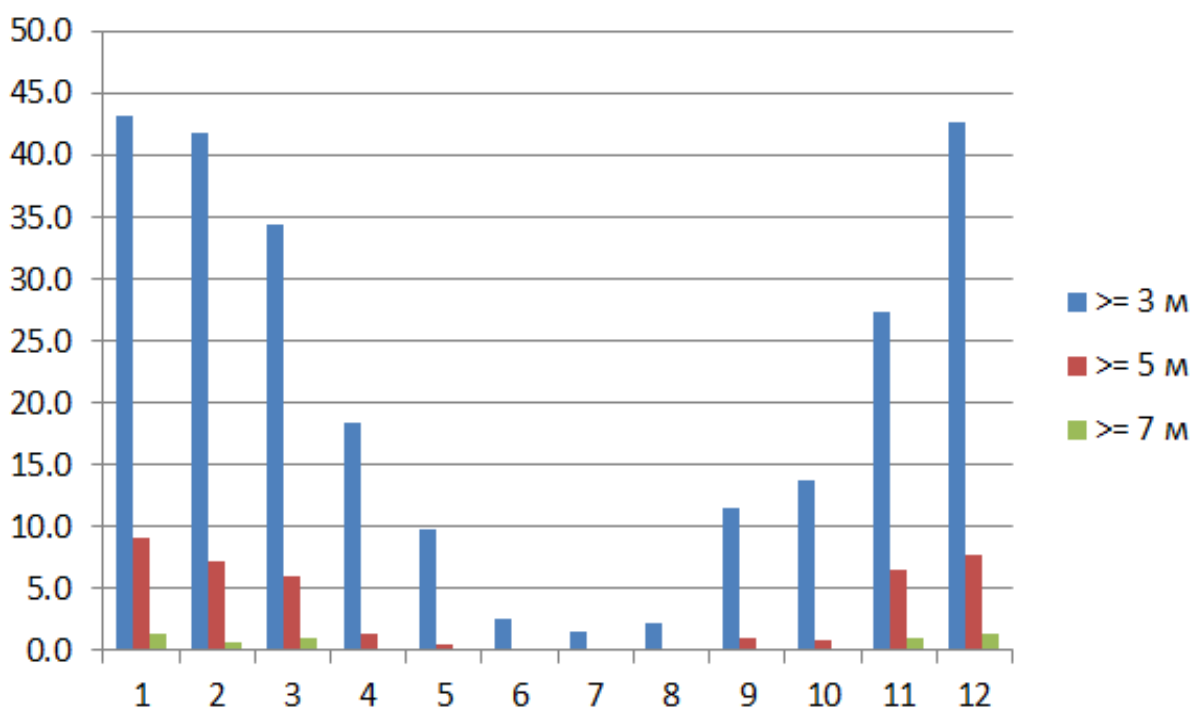


Рисунок 3.28 – Повторяемость высоты волны по месяцам для района 3.

Распределение годового хода по месяцам с повторяемостями высоты волны 3, 5 и 7 метров и более показано на графиках по районам (рисунки 3.26-3.28). На графиках виден хорошо выраженный годовой ход с максимумом в декабре и январе и минимумом в июле для всех трех районов. Высота волнения 7 м и более находится на минимальном уровне, тогда как высота волнения 3 м и

более достигает 43% в открытых частях моря и 19% в прибрежной зоне. Для первого района повторяемость волны 3м и более в декабре и январе составляет 18,5%, для второго в декабре - 35%, для третьего - 43% из всех случаев. В июле повторяемость таких волн для всей акватории Баренцева моря не более 2%. Волны высотой 5м и более чаще всего наблюдаются в декабре в первом районе (3%), в январе и декабре - во втором (6%) и в январе в третьем районе (9%).

3.3. Распределение волн по градациям по районам

Построены графики повторяемости волнения по градациям для трех районов Баренцева моря в период с 2000 по 2024 гг.

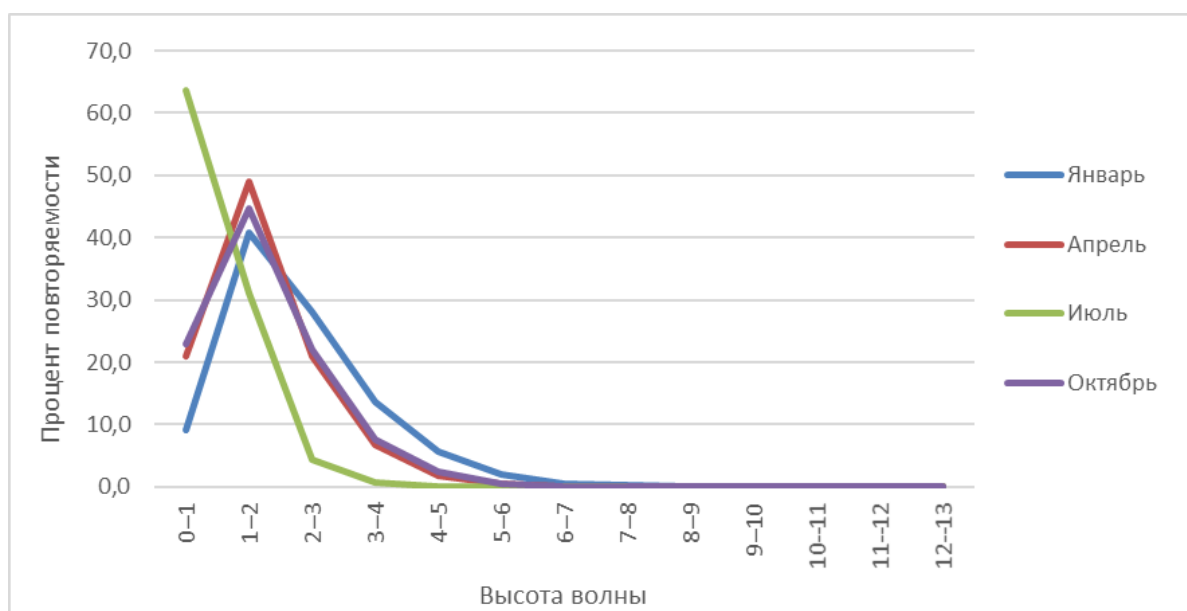


Рисунок 3.29 – Повторяемость высоты волны по градациям для района 1.

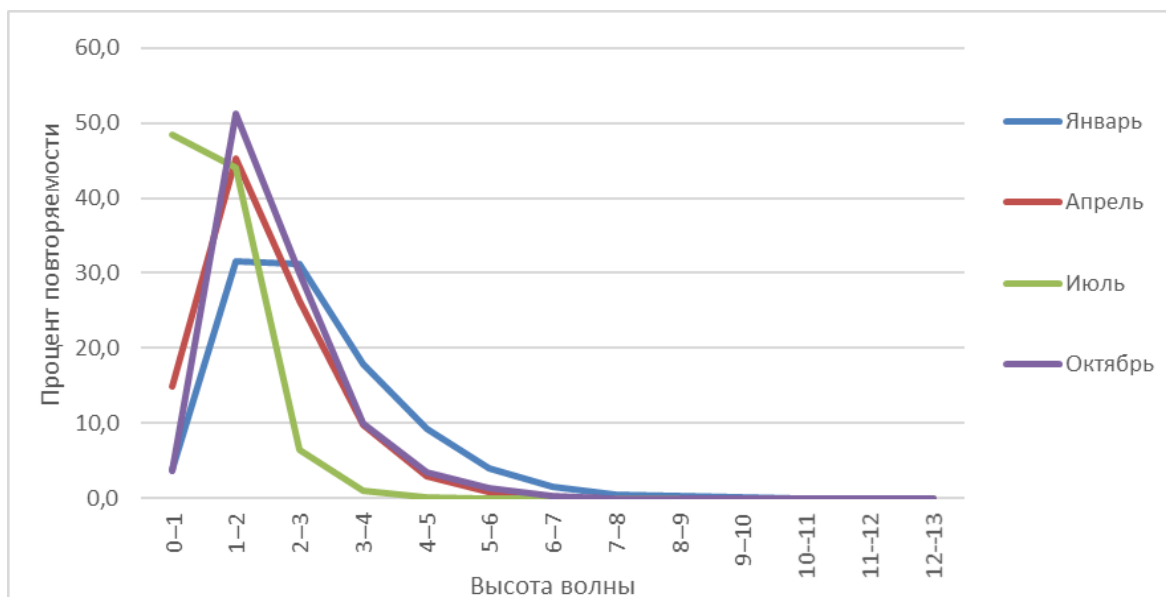


Рисунок 3.30 – Повторяемость высоты волны по градациям для района 2.

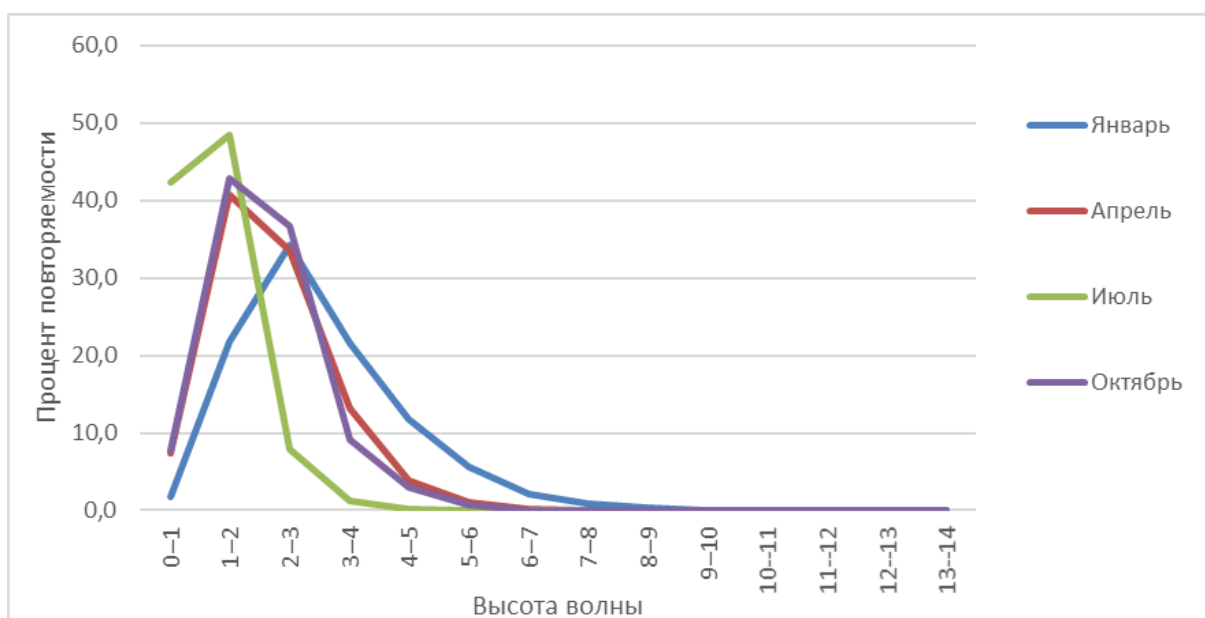


Рисунок 3.31 – Повторяемость высоты волны по градациям для района 3.

Для района 1 (рисунок 3.29) преобладание волн 1-2 м зимой, осенью и весной (от 40 до 50%), а летом преобладают волнения 0-1 м (64%)

Для района 2 (рисунок 3.30) зимой преобладают волнения 1-2 и 2-3 м (31% повторяемости каждой из градации), весной и осенью преобладают волнения 1-2 м (45 и 51% соответственно), а летом преобладание волн 0-1 м (48% повторяемости)

Для района 3 (рисунок 3.31) зимой преобладают волнения 2-3 метра (35%), весной, осенью и летом 1-2 метра (40% - весной, 43% - осенью и 50% - летом).

3.4. Розы ветров при сильных волнениях в Баренцевом море

Для анализа характерных ветров, при которых наблюдается волнение выше заданных градаций, построены розы. (рисунки 3.32 – 3.40).

Для первого района (рисунки 3.32 – 3.34), то есть прибрежной зоны, направление ветра во все сезоны в основном имеет западное и северо-западное направление (270-315°)

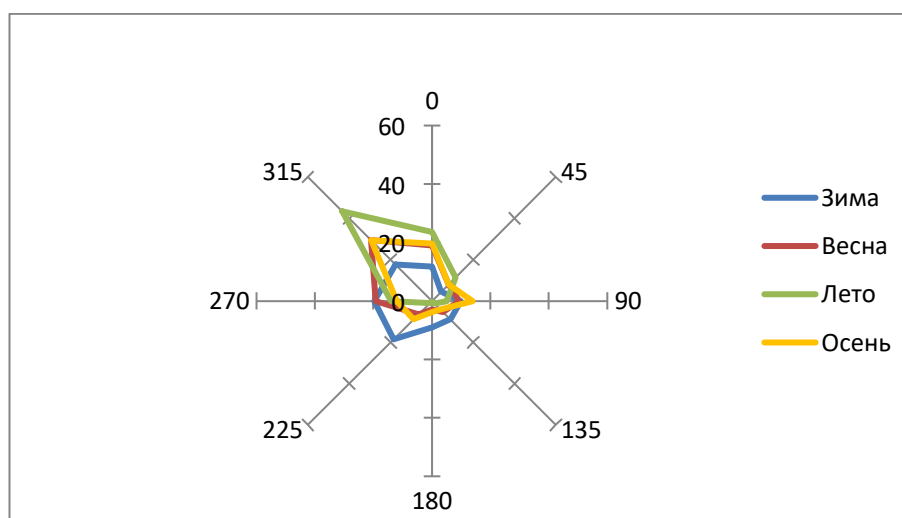


Рисунок 3.32 – Направление ветра при волнении 3 м и более для 1 района

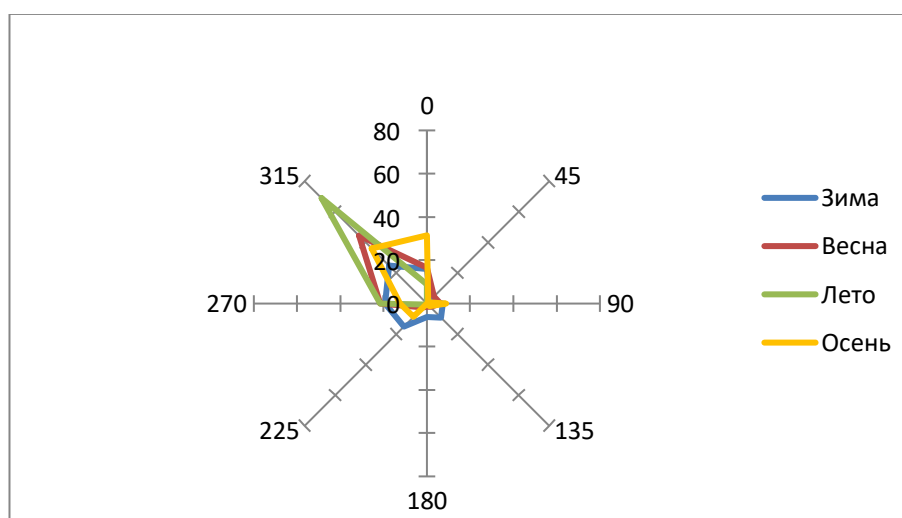


Рисунок 3.33 – Направление ветра при волнении 5 м и более для 1 района

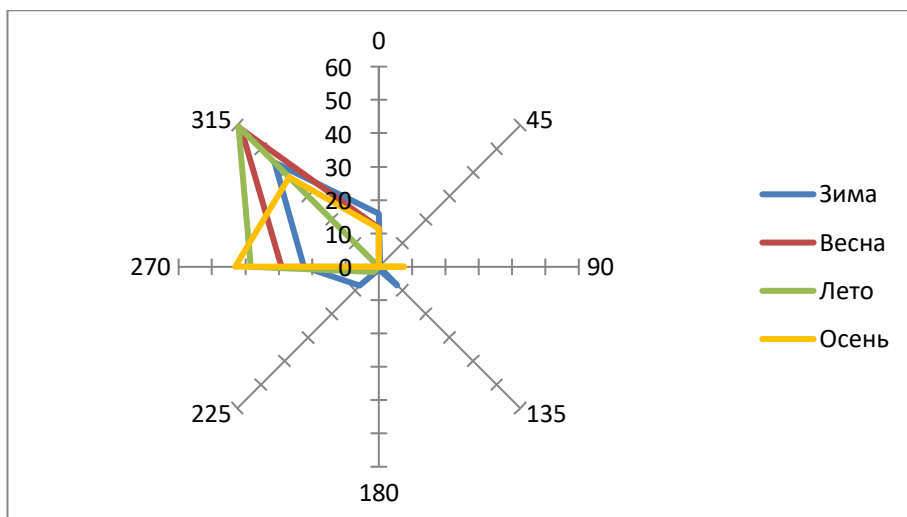


Рисунок 3.34 – Направление ветра при волнении 7 м и более для 1 района

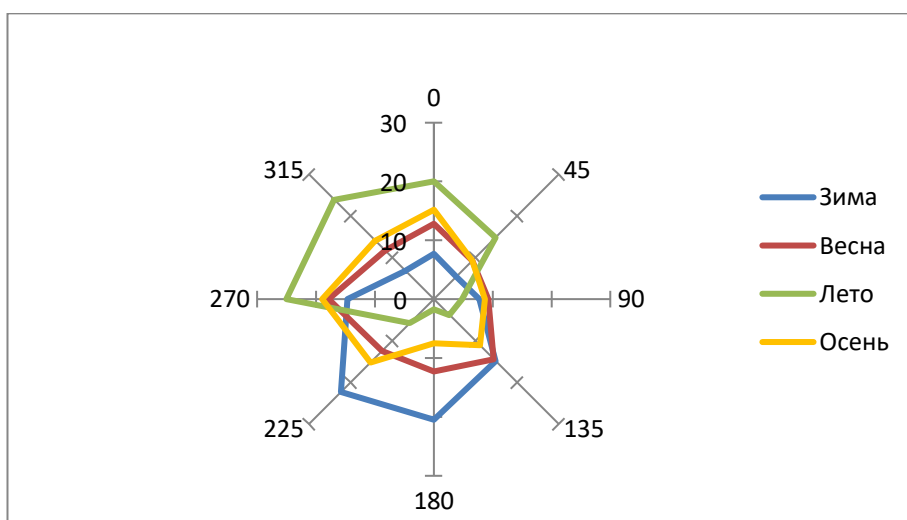


Рисунок 3.35 – Направление ветра при волнении 3 м и более для 2 района

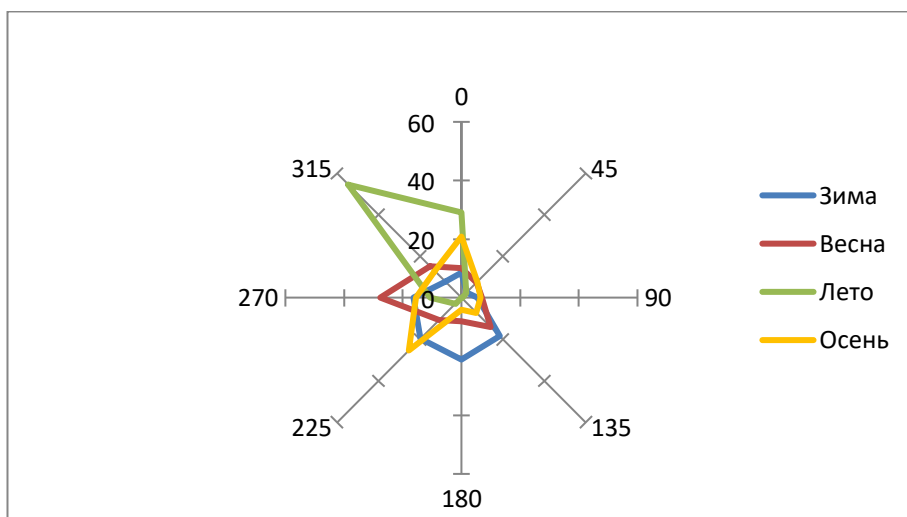


Рисунок 3.36 – Направление ветра при волнении 5 м и более для 2 района

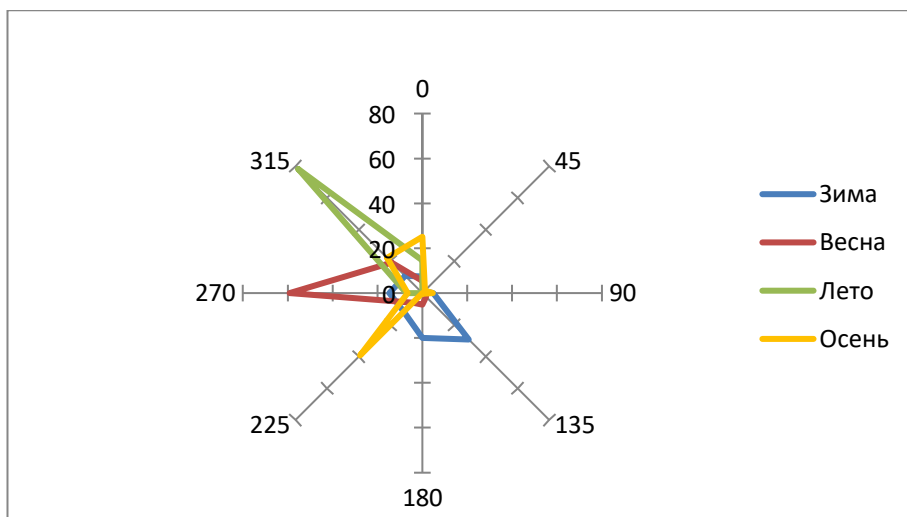


Рисунок 3.37 – Направление ветра при волнении 7 м и более для 2 района

Для второго района (рисунки 3.35-3.37), то есть центральной части моря весной и осенью направление ветра при волнении 3 м и более – неопределенное. Летом направление меняется от западного до северо-восточного (270-45°). Зимой направление меняется от юго-восточного до западного (135- 270°). Для волн 5 метров и более направление зимой от юго-восточного до западного (135-270°). Летом направление северо-восточное или северное (315 до 0°). Для волнения 5 м и более летом, весной и осенью в основном в пределах от юго-западного до северного (225-360°), а зимой от юго-восточного до западного (135 до 270°). Для волнения более 7 м зимой направление преимущественно юго-восточное (135°), осенью юго-западное (225°), летом северо-западное (315°) и весной западное (270°).

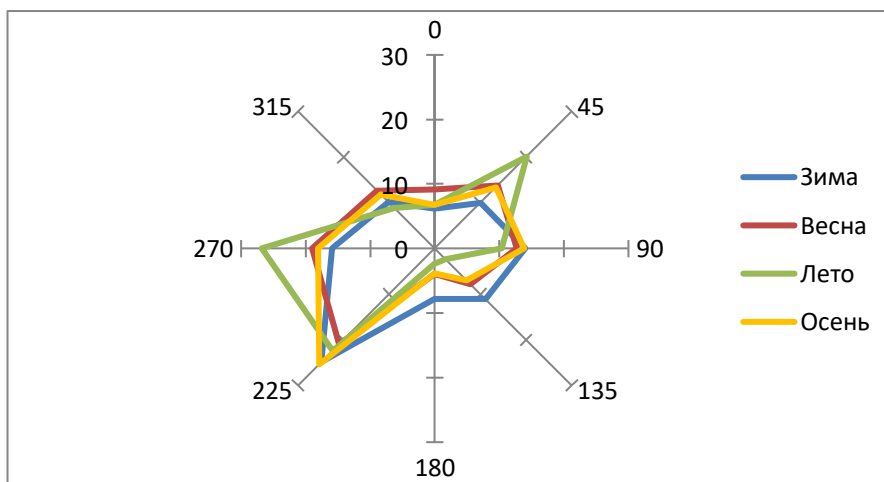


Рисунок 3.38 – Направление ветра при волнении 3 м и более для 3 района

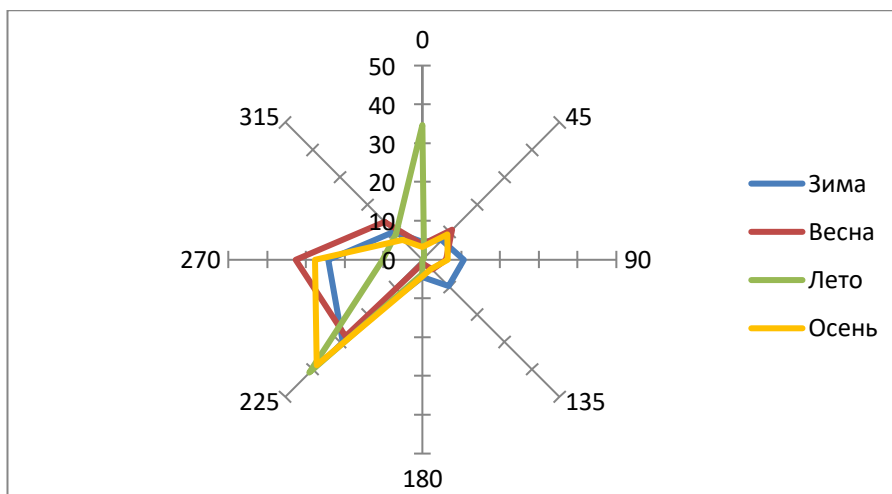


Рисунок 3.39 – Направление ветра при волнении 5 м и более для 3 района

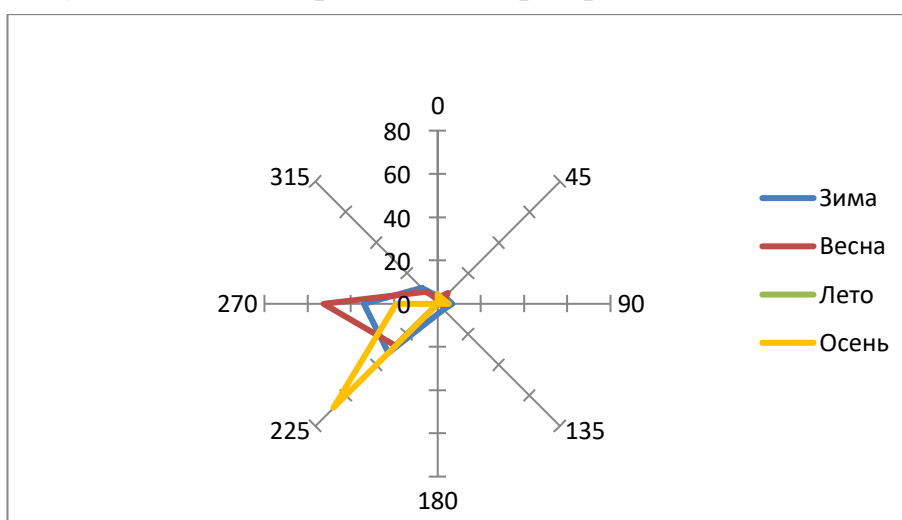


Рисунок 3.40 – Направление ветра при волнении 7 м и более для 3 района

Для третьего района (рисунки 3.38-3.40), то есть западной части моря для волнения 3 м и более направление ветра во все сезоны неопределенное, для волнения 5 м и 7 м и более направление за весну, осень и зиму в основном в пределах от юго-западного до западного (225 до 270°), летом направление волнения 5 м и более в основном западное или северное (270 или 0°), а более 7 м летом не наблюдалось.

3.5 Синоптический анализ случаев с сильным волнением

Построена таблица со случаями наибольшей волны в Баренцевом море с 2000 по 2024 гг. С помощью этой таблицы можно сделать выводы о наиболее частых синоптических ситуациях при сильной волнении.

Н волны, м	День	Месяц	Год	Район	Синоптическое положение	Направление движения	Глубина, ГПа	Стадия развития
13	21	3	2022	3	Тыловая часть циклона	СВ	970	Максимального развития
13	13	3	2015	3	Периферия	-	-	-
11,5	30	1	2024	2	Тыловая часть циклона	СВ	950	Максимального развития
10,4	24	7	2010	1	Теплый сектор циклона	СВ	975	Максимального развития
10	6	1	2017	2	Передняя часть циклона	В	980	Максимального развития
9,5	9	2	2009	1	Периферия	-	-	-
9,5	8	2	2023	3	Теплый сектор циклона	СВ	955	Максимального развития
9	7	1	2000	2	Периферия	-	-	-
9	24	1	2023	3	Тыловая часть циклона	В	970	Максимального развития
9	11	1	2019	3	Тыловая часть циклона	В	955	Максимального развития
8,4	14	1	2006	2	Периферия	-	-	-
8,3	15	3	2016	1	Тыловая часть циклона	В	970	Максимального развития
8,1	5	1	2021	3	Тыловая часть циклона	СВ	985	Максимального развития
8,1	24	2	2010	2	Периферия	-	-	-
8	28	2	2023	1	Тыловая часть циклона	ЮВ	980	Максимального развития
8	19	1	2001	3	Тыловая часть циклона	В	975	Максимального развития
8	12	1	2010	1	Тыловая часть циклона	В	975	Максимального развития
8	11	3	2004	1	Теплый сектор циклона	В	970	Максимального развития
7,8	28	2	2003	2	Тыловая часть циклона	ВСВ	970	Максимального развития
7,7	17	3	2011	3	Периферия	-	-	-

Таблица 3.1 – Случаи наибольшей волны в Баренцевом море с 2000 по 2024 гг.

Было выделено 20 случаев появления очень сильного волнения. Можно сделать вывод о синоптической ситуации в момент таких волнений:

- Теплый сектор циклона – 15%
- Периферия между циклоном и антициклоном – 30%
- Тыловая часть циклона – 50%
- Передняя часть циклона – 5%

В целом можно сделать вывод, что направление движения циклона в 95% случаев было восточное или северо-восточное. Циклоны находились в стадии максимального развития и с глубиной от 950 до 985 ГПа.

3.6 Синоптический анализ при появлении очень сильного волнения для 3 районов.

В качестве примера, рассмотрим отдельные случаи с сильным волнением для 3 районов.

28 февраля 2023 года 12 UTC в третьем районе Баренцева моря наблюдалась волна высотой 8 метров. Циклон северный, он зародился над архипелагом Шпицберген и двигался в юго-восточном направлении. Находился в стадии максимального развития с глубиной около 980 гПа.

Зона высоких барических градиентов, и, следовательно, высокой волны находится в западной части циклона, увеличение градиента давления происходит за счет барического гребня над Норвежским морем.

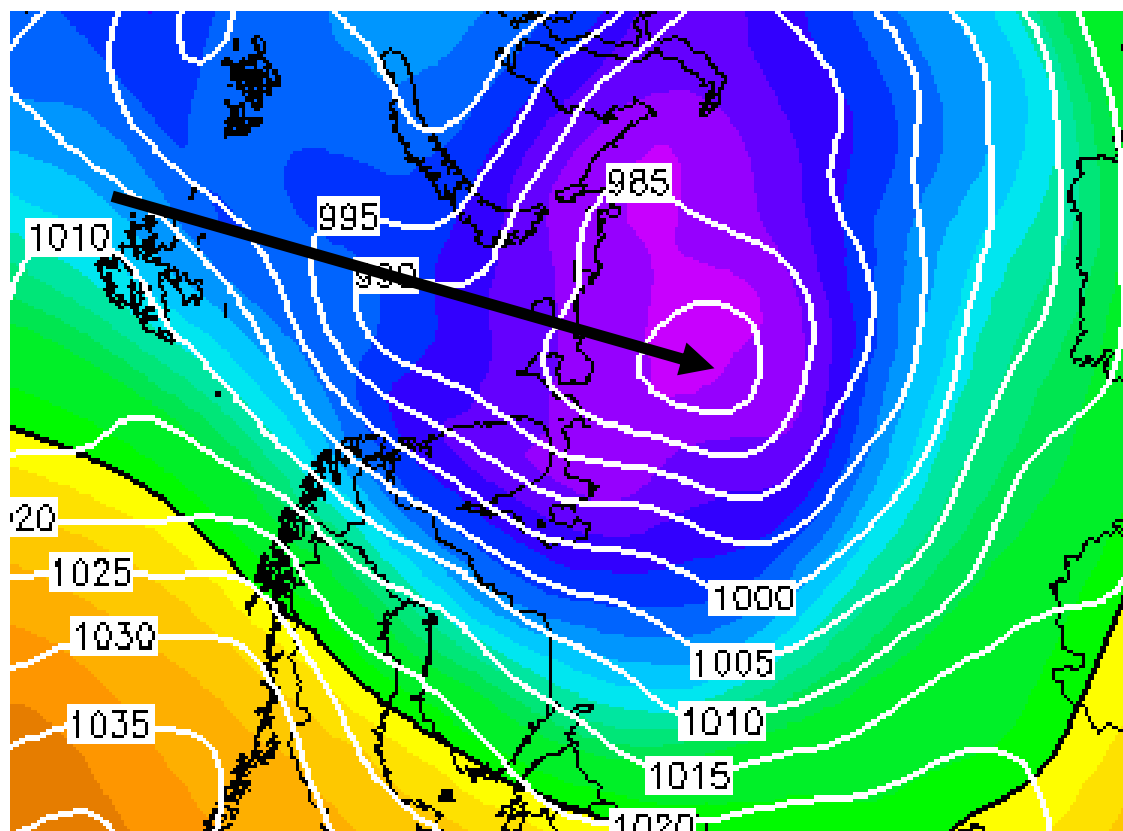


Рисунок 3.42 – Синоптическая ситуация для 1 района 28.02.2023 в 12 UTC

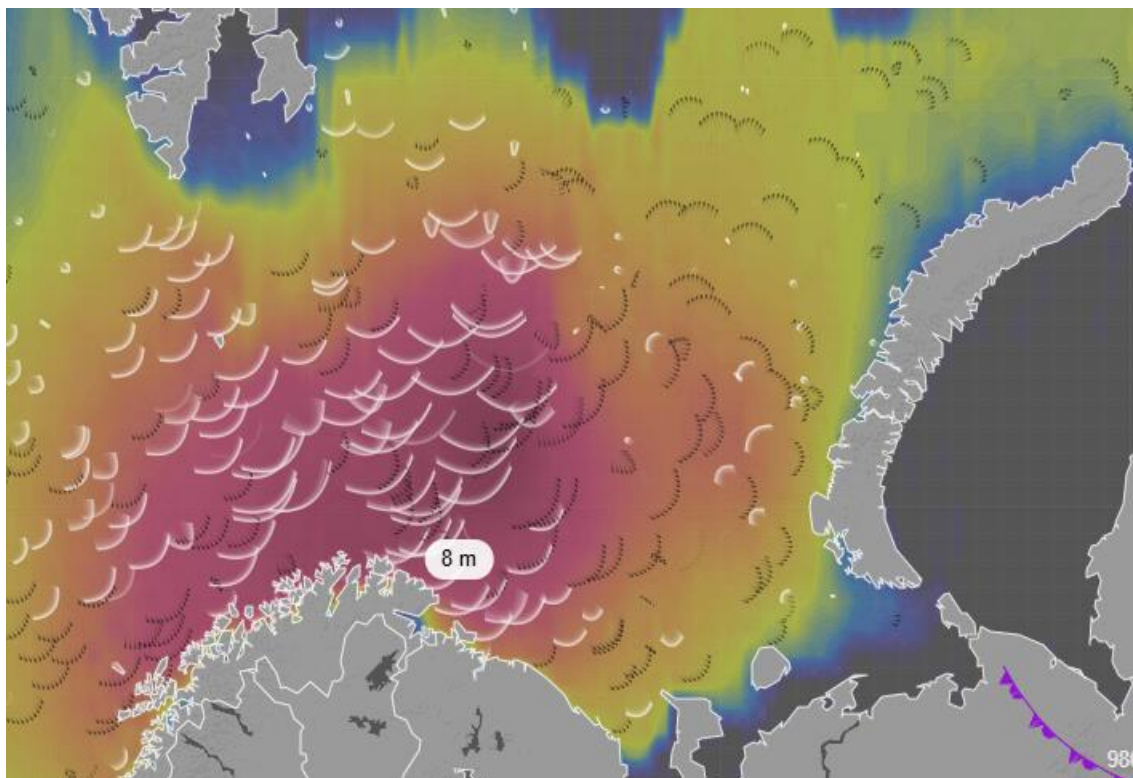


Рисунок 3.43 – Направление волны 28.02.2023 в 12 UTC

30 января 2024 года в 00 UTC во втором районе Баренцева моря наблюдалась волна около 11 метров. Такое волнение связано с прохождением циклона над акваторией моря. Он зародился у берегов Исландии и двигался в северо-восточном направлении.

Циклон был в стадии максимального развития с глубиной около 950 гПа. Область высокого давления над континентом усиливало градиенты давления. Зона высокой волны сдвинута на юг по сравнению с первым случаем.

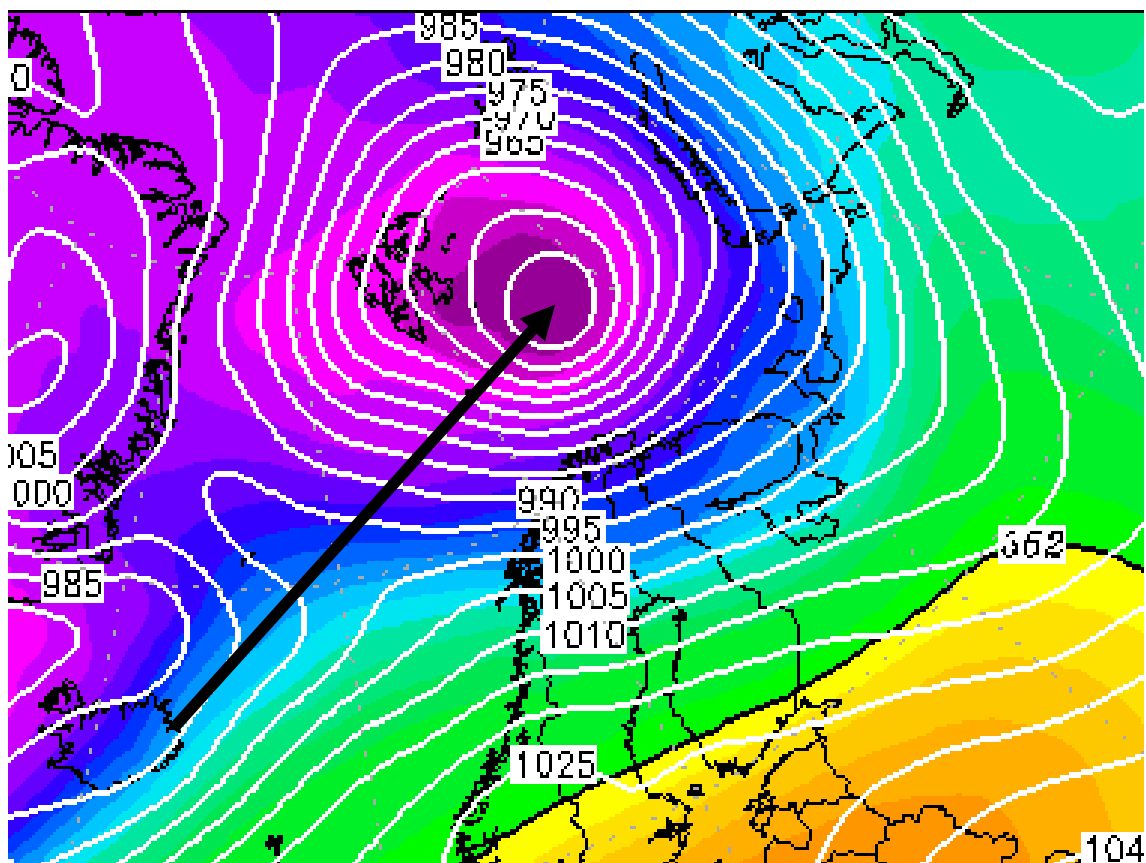


Рисунок 3.44 – Синоптическая ситуация для 2 района 30.01.2024 в 00 UTC

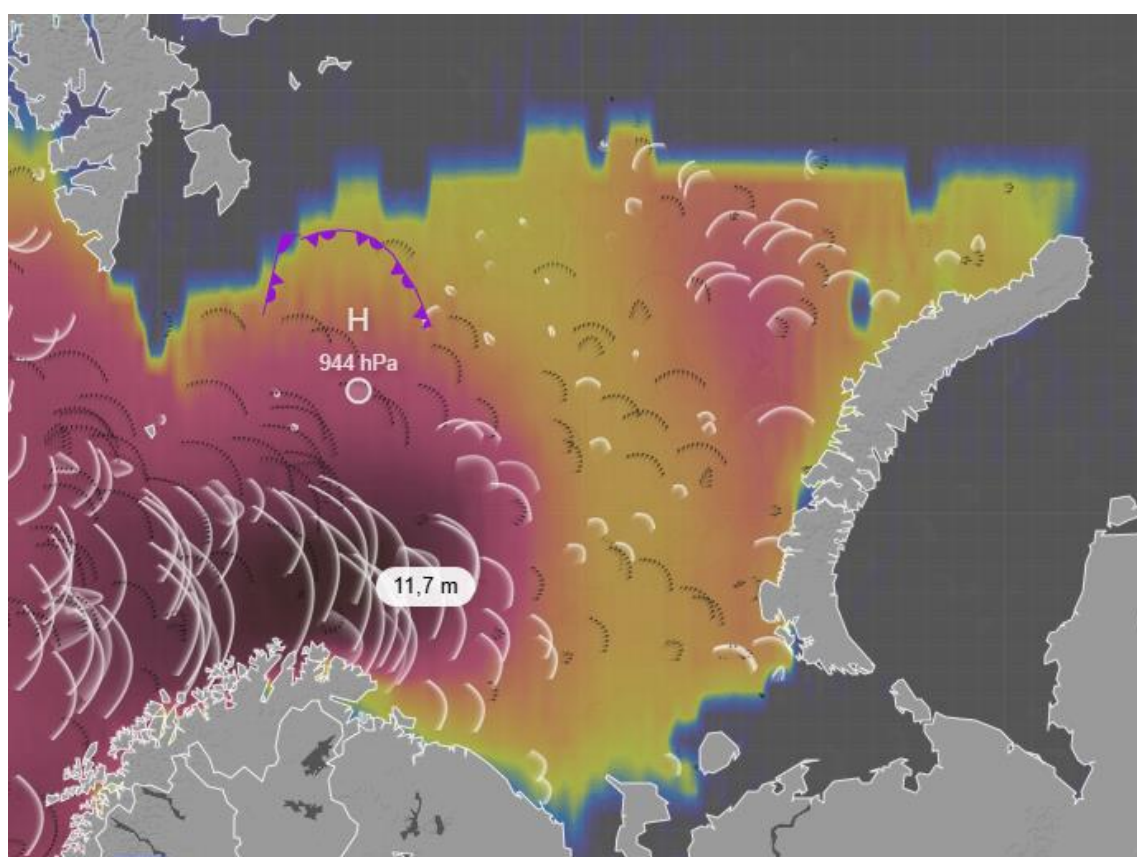


Рисунок 3.45 – Направление волны 30.01.2024 в 00 UTC

21 марта 2021 года в 18 UTC в третьем районе Баренцева моря наблюдалась волна около 13 метров.

Такое волнение связано с прохождением циклона над акваторией моря. Он также зародился у берегов Исландии и двигался в северо-восточном направлении. Волнение наблюдалось после прохождения холодного фронта, в тыловой части циклона. Циклон был в стадии максимального развития с глубиной около 970 гПа. Зона высокой волны сдвинута на север по сравнению со случаем для второго района.

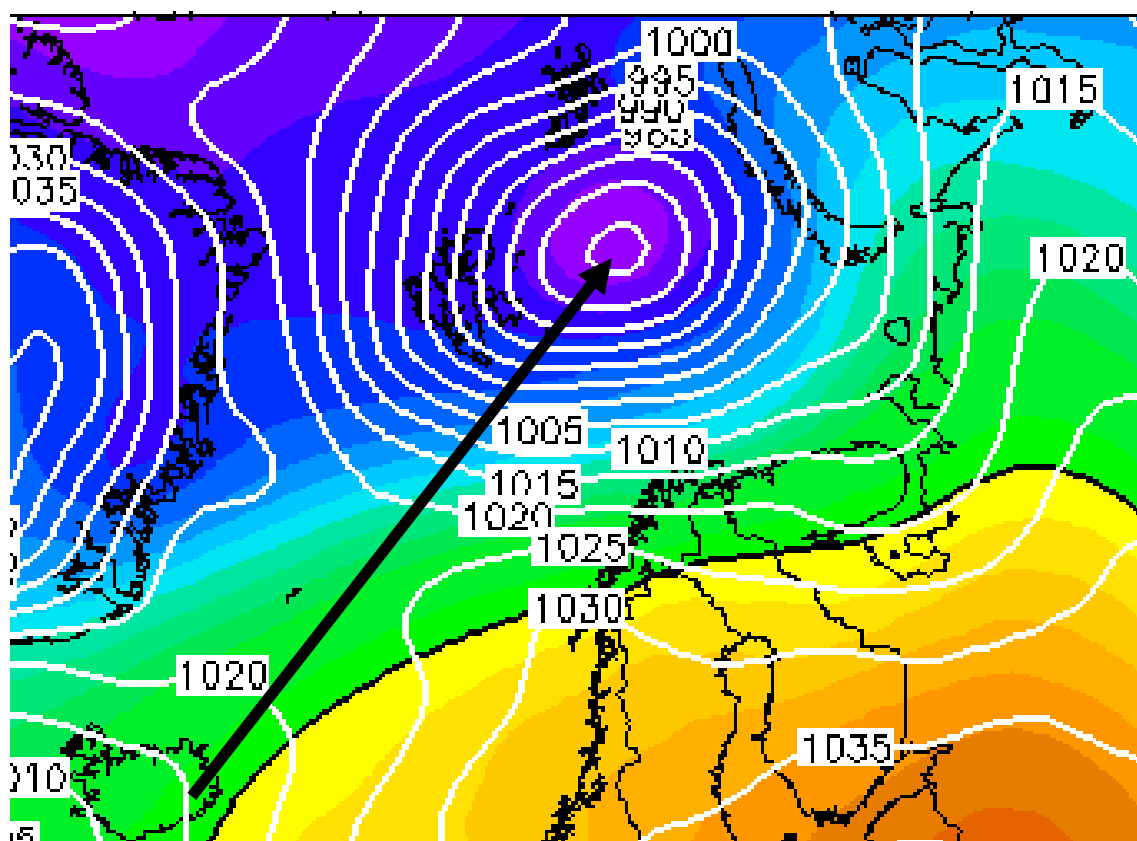


Рисунок 3.46 – Синоптическая ситуация для 3 района 21.03.2022 в 18 UTC

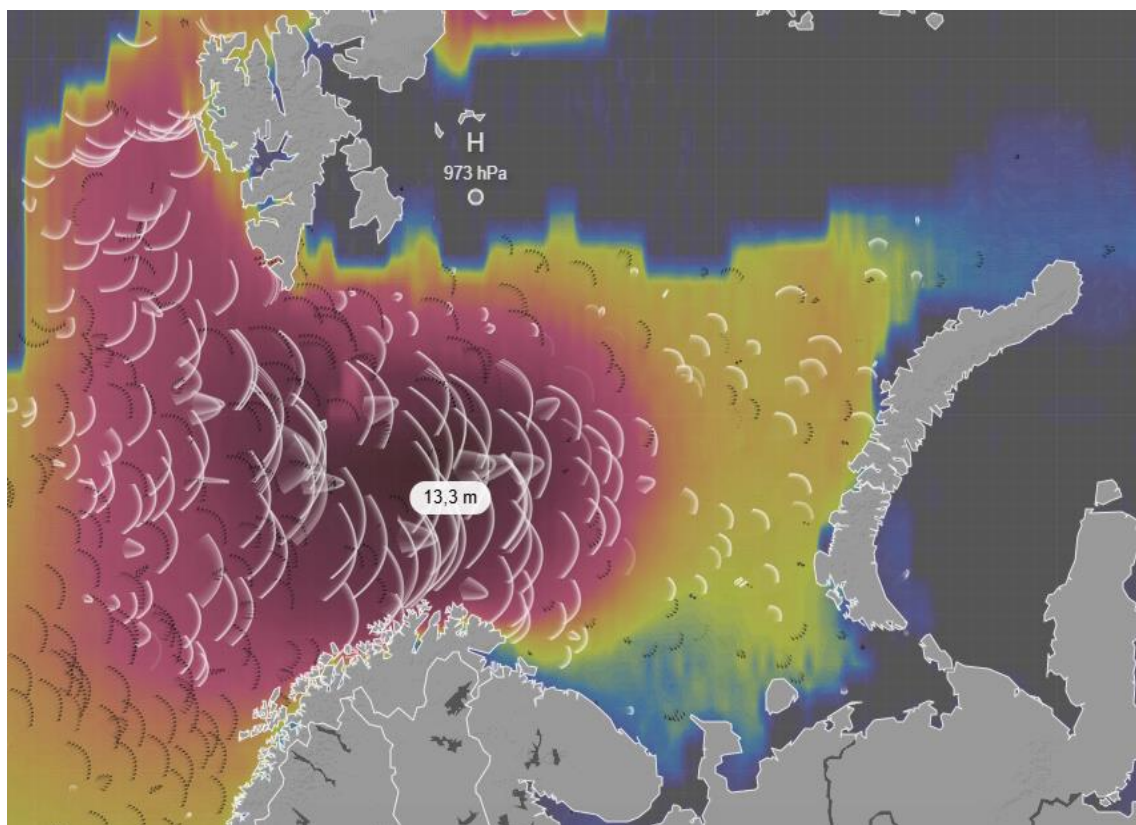


Рисунок 3.47 – Направление волны 21.03.2022 в 18 UTC

Заключение

В рамках работы были выполнены следующие задачи:

- Сформирован массив данных по ветру и волнению по акватории Баренцева моря
- Построены карты повторяемости волнения 3 м и более; 5 м и более
- Построены графики повторяемости волнения по градациям для трех районов Баренцева моря.
- Построены розы ветров для случаев волнения 3 м и более; 5 м и более и 7 м и более
- Выполнен синоптический анализ наиболее частых ситуаций для случаев с сильным волнением.

В результате проведенных исследований удалось сделать следующие выводы:

Наиболее часто в Баренцевом море возникают волнения:

- Для первого района: от 1 до 2 метров (40-50%);
- Для второго района: весной и осенью – от 1 до 2 метров (40% и 51%), зимой от 1 до 3 метров (60%), а летом от 0 до 1 метра (48%);
- Для третьего района: зимой преобладают волнения 2-3 метра (35%). Весной, осенью и летом 1-2 метра (40% - весной, 43% - осенью и 50% - летом).
- Сильные волнения характерны для зимних месяцев (до 55% повторяемости), так как в это время года наиболее активны атлантические циклоны. В теплое время года повторяемость таких волнений минимально из-за антициклонического влияния.
- Наиболее подвержены такому волнению западные (до 55% повторяемости) и центральные части (до 35% повторяемости) Баренцева моря, так как теплое течение Гольфстрим не позволяет ему замерзнуть.

- Для первого района в большинстве случаев направление ветра при сильном характеризуются северо-западными ветрами (до 50% повторяемости). Для второго и третьего однозначно нельзя сказать о преобладании какого-либо из направлений.
- Штормовые волны в основном возникают под действием циклонов, пришедших с Атлантики в их стадии максимального развития при больших градиентах давления. Наиболее часто сильное волнение возникает в тыловой части циклона (50%).

Список литературы

1. Баренцево море. Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс] URL: <https://bigenc.ru/c/barentsevo-more-37b31a> (дата обращения: 11.05.2025)
2. Баренцево море: где оно находится в России [Электронный ресурс] URL: <https://mksegment.ru/d/barencevo-more-gde-ono-nahoditsya-v-rossii> (дата обращения: 28.04.2025)
3. Баренцево море [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Баренцево_море (дата обращения: 12.05.2025)
4. Титов Л.Ф. Ветровые волны. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 256 с.
5. И.Н. Давидан, Л.И. Лопатухин, В.А.Рожков. Ветер и волны в океанах и морях – Ленинград: Изд-во Транспорт, 1974 – 359 с.
6. Мысленков С.А., Шестакова А.А., Торопов П.А. Численное моделирование штормового волнения у северо-восточного побережья Черного моря с использованием различного ветрового форсинга // Метеорология и гидрология, 2016, № 10, С. 61-71
7. И.М.Кабатченко, д-р геогр. наук (руководитель разработки), А.Р.Введенский, канд. техн. наук (ответственный исполнитель), Н.А.Дианский, д-р физ.-мат. наук, М.В.Резников, В.В.Фомин (ФГБУ "ГОИН"); Г.И.Литвиненко, д-р техн. наук, А.Г.Литвиненко (НПК "МорТрансНииПроект"), С.Н.Куличков, д-р физ.-мат. наук, В.Г.Полников, д-р физ.-мат. наук (ФГБУН "Институт физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН"). РД 52.10.865 – 2017. Руководство по расчету режимных характеристик морского ветрового волнения.
8. РД 52.04.563-2002 [Электронный ресурс] URL: <https://meteo-orw.ru/meteobooks/instrukcija--kriterii-opasnyh-gidrometeorologicheskikh-javlenij-i-porjadok-podachi-shtormov.pdf> (дата обращения: 30.05.2025)
9. Г. В. Алексеев, Светлана И. Кузьмина, А. В. Уразгильдеева, Леонид Бобылев. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛА И ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ НА

- УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В АРКТИКЕ ЗИМОЙ. DOI 10.21513/2410-8758-2016-1-43-63 // Fundamental and Applied Climatology. 01.01.2016 URL: http://downloads.igce.ru/journals/FAC/FAC_2016/FAC_2016_1/Alekseev_G_V_etc_FAC_2016_N1_08082016.pdf (дата обращения: 01.06.2025).
10. Татьяна Васильевна Белоненко, Алексей Кольдунов, Евгения В. Сентябова, Алексей Леонидович Карсаков. Термогалина структура Лофотенского вихря в Норвежском море на основе данных в режиме реального времени и модельных данных. DOI 10.21638/spbu07.2018.406 // Vestnik of Saint Petersburg University Earth Sciences. 01.01.2018 URL: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/4480> (дата обращения: 20.05.2025).
11. Явления на поверхности океана / А. С. Монин, В. П. Красицкий. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. - 375 с. : ил.; 22 см.; ISBN В пер. (В пер.) : 4 р. 10 к.
12. Карты реанализа [Электронный ресурс] URL: <https://www.wetterzentrale.de/> (дата обращения: 01.06.2025).
13. Карты реанализа [Электронный ресурс] URL: <https://www.ventusky.com/> (дата обращения: 01.06.2025).