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: «Опасные явления погоды по ветру над акваторией Российской Арктики»

Исполнитель Ганчо Тимофей Борисович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель 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)

«09» июня 2025 г.

Санкт–Петербург
2025

Оглавление

Введение 3
1.Климатические особенности Арктики и их современные изменения 6
1.1. Уникальные особенности арктического климат 6
1.2. Атмосферная циркуляция и её роль в формировании климата 7
1.3. Влияние океанических течений на климат региона 8
1.4. Феномен арктического усиления потепления 9
1.5. Динамика изменения ледового покрова. 12
1.6. Комплекс причин климатических изменений 12
1.7. Последствия климатических трансформаций 13
2. Формирование опасных явлений в Арктике 14
2.1. Сильные ветры (≥15 м/с) в арктическом регионе 14
2.2. Интенсивное обледенение (≥0,7 мм/час) 15
2.3. Высокое волнение (≥4 м) 16
2.4. Комплексное воздействие опасных явлений 17
3. Прогнозирование и методы противодействия опасным явлениям в Арктике 19
3.1. Современные методы прогнозирования опасных явлений 19
3.2. Технологии защиты от сильных ветров 20
3.3. Методы борьбы с обледенением 20
3.4. Способы минимизации воздействия высоких волн 21
3.5. Комплексные системы безопасности 22
4. Анализ данных по ветровому режиму в районе СМП. 23
4.1 Обработка полученных данных по району СМП 23
4.2 Расчет повторяемости неблагоприятных ветров и их продолжительность. 28
4.3 Анализ ветрового режима на основе полученных данных. 30
5. Брызговое обледенение судов. 32
5.1 Вычисление брызгового обледенению по методу Д. Оверлэнда. 32
5.2 Расчет повторяемости брызгового обледенения. 33
5.3 Анализ повторяемости брызгового обледенения. 36
6. Волновой режим в акваториях СМП. 40

6.1 Обработка данных ветро-волнового режима. 40
6.2 Расчет повторяемости опасного волнения. 41
6.3 Анализ полученных результатов. 43
Литература 47
Приложение 48
1. Карты продолжительности штормового ветра 48

Введение

Современная эпоха характеризуется беспрецедентным интересом к арктическому региону, который на протяжении многих столетий оставался малоизученной территорией для большей части человечества. Арктика, этот величественный и суровый край вечных льдов и бескрайних снежных просторов, в последние десятилетия превратилась в объект пристального внимания со стороны ученых, политиков и бизнес-сообщества. Уникальные климатические условия этого региона, его стратегическое географическое положение и богатейшие природные ресурсы делают Арктику важнейшим элементом глобальной экосистемы и перспективным направлением для экономического развития.

В контексте глобальных климатических изменений изучение арктического региона приобретает особую актуальность. Наблюдаемое в последние годы стремительное сокращение площади ледяного покрова открывает новые возможности для судоходства, одновременно создавая серьезные вызовы в области экологической безопасности и устойчивого развития. Северный морской путь, являющийся исторически значимой транспортной артерией, в современных условиях получает новый импульс для развития, что требует всестороннего анализа факторов, влияющих на безопасность мореплавания в этом исключительно сложном регионе.

Климатические особенности Арктики представляют собой уникальный природный феномен, формирующийся под воздействием сложного взаимодействия атмосферных, океанических и криосферных процессов. Экстремально низкие температуры, продолжительные полярные ночи, мощные ледовые массивы и характерные только для этого региона атмосферные явления создают особые условия, которые необходимо учитывать при организации любой деятельности в высоких широтах. При этом динамика климатических изменений в Арктике демонстрирует значительно более высокие темпы потепления по сравнению с другими

регионами планеты, что делает изучение местных метеорологических процессов особенно важным с научной и практической точек зрения.

Опасные гидрометеорологические явления, характерные для арктического региона, представляют серьезную угрозу для морской навигации. Мощные штормовые ветры, достигающие ураганной силы; интенсивное обледенение судовых конструкций; высокие штормовые волны и непредсказуемое поведение ледового покрова - все эти факторы создают исключительно сложные условия для мореплавания. Понимание природы этих явлений, закономерностей их возникновения и развития является важнейшим условием обеспечения безопасности судоходства в арктических водах.

В свете возрастающей экономической активности в Арктике вопросы изучения местных климатических особенностей и связанных с ними опасных природных явлений приобретают особую значимость. Развитие Северного морского пути, освоение шельфовых месторождений углеводородов, расширение научных исследований - все эти направления деятельности требуют глубокого понимания специфики арктического климата и его влияния на различные аспекты человеческой деятельности. Особое значение приобретает разработка эффективных методов прогнозирования опасных явлений и создания надежных систем обеспечения безопасности мореплавания.

Актуальность исследования климатических особенностей Арктики и связанных с ними опасных природных явлений обусловлена также необходимостью разработки адаптационных стратегий в условиях наблюдаемых климатических изменений. Динамика изменения ледовой обстановки, трансформация атмосферных процессов и изменение характеристик опасных гидрометеорологических явлений требуют постоянного обновления научных знаний и совершенствования методов их практического применения.

В данном исследовании предпринята попытка всестороннего анализа климатических условий Арктики с особым акцентом на опасные природные явления, представляющие угрозу для морской навигации. Работа направлена на систематизацию современных знаний о механизмах формирования арктического климата, особенностях проявления опасных гидрометеорологических явлений и их влиянии на различные аспекты судоходства в высоких широтах. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования методов обеспечения безопасности мореплавания в арктическом регионе, разработки превентивных мер и стратегий адаптации к изменяющимся климатическим условиям.

Особое внимание в исследовании уделено комплексному анализу взаимодействия различных факторов, формирующих опасные условия для судоходства в Арктике. Рассмотрены не только отдельные опасные явления, но и их комбинации, которые зачастую представляют наибольшую угрозу для морской навигации. Исследование базируется на современных научных данных и включает анализ как традиционных, так и новых вызовов, связанных с изменением климатических условий в арктическом регионе.

1.Климатические особенности Арктики и их современные изменения

1.1. Уникальные особенности арктического климат

Арктический регион представляет собой уникальную климатическую зону, обладающую рядом исключительных характеристик, которые делают его совершенно особенным по сравнению с другими регионами нашей планеты. Климат Арктики формируется под воздействием целого комплекса взаимосвязанных факторов, создающих экстремальные условия, не имеющие аналогов в других частях земного шара.

Главной отличительной чертой арктического климата является его экстремальный радиационный баланс, который обусловлен особым географическим положением региона в высоких широтах. Низкий угол падения солнечных лучей, а в зимний период - продолжительная полярная ночь, длящаяся в некоторых районах до нескольких месяцев, создают устойчивый и значительный дефицит тепла. Это фундаментальное отличие арктического климата проявляется во всех аспектах метеорологических процессов региона.

Особое значение в формировании климата Арктики играет высокое альбедо снежно-ледового покрова, достигающее впечатляющих значений в 80-90%. Это означает, что подавляющая часть поступающей солнечной радиации не поглощается поверхностью, а отражается обратно в атмосферу, что значительно усиливает охлаждающий эффект. Такие уникальные характеристики создают неповторимые для Арктики суровые температурные условия с продолжительной морозной зимой, длящейся до 8-9 месяцев, и коротким прохладным летом, когда температура даже в самые теплые месяцы редко превышает +5...+10°C.

Важно отметить, что арктический климат отличается не только экстремально низкими температурами, но и их удивительным постоянством. В зимний период температура может неделями держаться на отметках -30...-40°C, а в отдельных районах, таких как центральная часть Гренландии или некоторые области Сибири, опускаться до рекордных -50...-60°C. При этом летнее потепление носит крайне непродолжительный и слабовыраженный характер, что создает особые условия для всех форм жизни в регионе.

Еще одной важной особенностью арктического климата является его исключительная зависимость от состояния ледяного покрова. Ледяной щит Арктики действует как гигантский климатообразующий фактор, влияя не только на температурный режим, но и на циркуляцию атмосферы и океанические течения. Это создает сложную систему обратных связей, где изменение одного параметра неизбежно влечет за собой трансформацию всей климатической системы региона.

1.2. Атмосферная циркуляция и её роль в формировании климата

Система атмосферной циркуляции в Арктике отличается выраженной сезонной изменчивостью и обладает рядом уникальных характеристик, которые оказывают решающее влияние на формирование местных погодных условий. В зимний период над регионом устанавливается мощный сибирский антициклон - область высокого атмосферного давления, которая создает условия для интенсивного выхолаживания приземного слоя воздуха. Этот антициклон является одним из самых устойчивых атмосферных образований на планете, сохраняясь практически без изменений в течение нескольких месяцев.

Летом картина атмосферной циркуляции кардинально меняется - активизируется циклоническая деятельность, особенно заметная в районах

Баренцева и Карского морей. Арктические циклоны, хотя и менее мощные, чем их аналоги в умеренных широтах, приносят увеличение облачности и осадков, что существенно влияет на радиационный баланс региона. Особенностью арктических циклонов является их способность переносить относительно теплые и влажные воздушные массы далеко на север, вызывая временные потепления даже в центральных районах Арктики.

Особую роль в изоляции арктического воздуха играет полярный вихрь - устойчивая система высотных ветров, которая формирует своеобразный барьер, ограничивающий проникновение теплых воздушных масс из средних широт. Этот вихрь является важнейшим элементом арктической климатической системы, обеспечивающим относительную стабильность климатических условий региона. Однако в последние годы метеорологи отмечают тревожную тенденцию к ослаблению полярного вихря, что приводит к более частым меридиональным процессам и интенсивному обмену воздушными массами между Арктикой и умеренными широтами.

Следует особо подчеркнуть, что атмосферная циркуляция в Арктике характеризуется исключительной изменчивостью и непредсказуемостью. Ветровые режимы могут меняться буквально в течение нескольких часов, создавая сложные условия для прогнозирования. Особенно это касается прибрежных районов, где взаимодействие воздушных масс с ледяным покровом и открытой водой создает сложную мозаику местных ветров, часто достигающих ураганной силы.

1.3. Влияние океанических течений на климат региона

Северный Ледовитый океан и система его течений играют ключевую роль в формировании и поддержании арктического климата, выступая в качестве важнейшего теплообменного механизма. Трансарктическое течение, пронизывающее центральную часть океана, осуществляет перенос водных

масс от Чукотского моря к проливу Фрама, создавая своеобразную "конвейерную ленту" для распределения тепла и солености в регионе.

Особое значение для климата Арктики имеют теплые атлантические воды, которые проникают через Баренцево море и, погружаясь под более легкие арктические воды, создают специфическую стратификацию водной толщи. Эти относительно теплые глубинные воды постепенно подтапливают морские льды снизу, влияя на их толщину и устойчивость. Современные исследования показывают, что именно увеличение притока атлантических вод в последние десятилетия стало одним из основных факторов сокращения ледового покрова в евразийской части Арктики.

В восточном секторе Арктики ощущается влияние тихоокеанских вод, поступающих через Берингов пролив. Хотя эти воды и холоднее атлантических, они все же вносят существенный вклад в общий баланс тепла и солености арктических морей. Особенностью тихоокеанского влияния является его сезонный характер - максимальный приток наблюдается в летне-осенний период, когда пролив свободен ото льда.

Сложное взаимодействие этих водных масс с атмосферными процессами создает уникальную климатическую систему, где изменения в океанической циркуляции могут вызывать каскадные эффекты во всей экосистеме региона. Особенно это заметно в последние десятилетия, когда потепление арктических вод приводит к целому ряду климатических аномалий, начиная от изменения ледового покрова и заканчивая трансформацией атмосферных процессов.

1.4. Феномен арктического усиления потепления

В последние десятилетия Арктический регион переживает беспрецедентные по скорости климатические изменения, которые существенно опережают среднемировые показатели. Этот уникальный феномен, получивший в научной литературе название "арктического

усиления" (Arctic Amplification), проявляется в том, что температура воздуха в регионе растет в 2-3 раза быстрее, чем в среднем на планете. Данное явление представляет собой один из наиболее ярких примеров региональной климатической аномалии глобального масштаба.

Особенно заметно потепление проявляется в зимний период, когда средние температуры повысились на 3-4°C по сравнению с серединой XX века. Такой выраженный температурный рост приводит к масштабным изменениям во всех компонентах климатической системы: существенно сокращается продолжительность холодного сезона, кардинально изменяется характер атмосферной циркуляции, значительно учащаются экстремальные погодные явления. Примечательно, что процессы потепления распределяются по территории Арктики крайне неравномерно - наибольшие изменения наблюдаются в районах, прилегающих к Атлантическому океану (Баренцево и Карское моря), тогда как в центральной части Арктического бассейна темпы потепления несколько ниже, хотя все равно превышают среднемировые показатели.

Механизмы арктического усиления представляют собой сложную систему положительных обратных связей. Основными факторами, способствующими ускоренному потеплению в регионе, являются:

1. Сокращение площади морского льда, приводящее к уменьшению альбедо и увеличению поглощения солнечной радиации океаном. В летний период открытая водная поверхность поглощает до 90% поступающей солнечной энергии, тогда как ледяной покров отражает 80-90% излучения.

2. Изменение теплообмена между океаном и атмосферой. Сокращение ледового покрова увеличивает площадь прямого контакта относительно теплых океанических вод с холодным арктическим воздухом, что приводит к дополнительному прогреву атмосферы.

3. Изменение облачного покрова. Увеличение испарения с открытой водной поверхности способствует формированию большего количества облаков, которые, в свою очередь, влияют на радиационный баланс региона.

4. Трансформация океанических течений. Усиление притока теплых атлантических вод в Арктический бассейн создает дополнительный источник тепла, способствующий таянию морского льда.

Особую озабоченность ученых вызывает тот факт, что арктическое усиление не ограничивается только самим регионом, но оказывает влияние на глобальную климатическую систему. Изменения в Арктике могут приводить к перестройке атмосферной циркуляции в умеренных широтах, что проявляется в учащении экстремальных погодных явлений - аномальных холодов зимой, волн жары летом, изменении характера осадков. Кроме того, таяние вечной мерзлоты высвобождает значительные объемы парниковых газов, что создает дополнительный вклад в глобальное потепление.

Современные климатические модели показывают, что тенденция к арктическому усилению будет сохраняться и в будущем. По различным сценариям, к концу XXI века температура в Арктике может повыситься на 7-10°C по сравнению с доиндустриальным уровнем, что приведет к фундаментальным изменениям всей экосистемы региона. Эти прогнозируемые изменения имеют огромное значение не только для природной среды Арктики, но и для экономической деятельности, инфраструктуры и условий жизни местного населения.

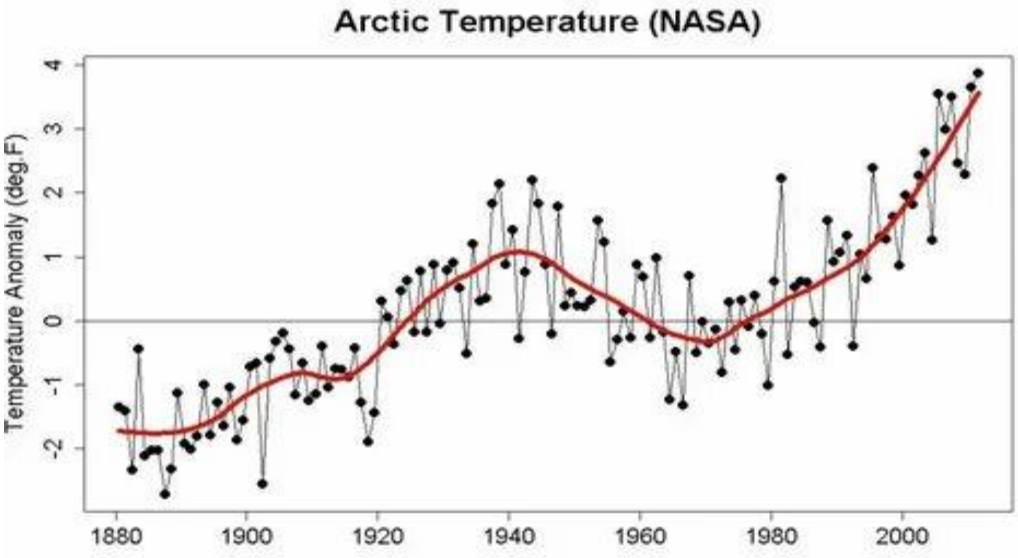

Рисунок 1 Изменчивость температурного режима Арктике.

1.5. Динамика изменения ледового покрова.

Состояние морского ледяного покрова является одним из наиболее чувствительных и наглядных индикаторов климатических изменений в Арктике. Спутниковые наблюдения, систематически ведущиеся с 1979 года, фиксируют устойчивую тенденцию к сокращению площади льда, особенно выраженную в летний период. В сентябре, когда ледовитость достигает своего годового минимума, площадь льда сокращается в среднем на 13% за десятилетие. Еще более тревожным является уменьшение толщины ледяного покрова - по данным замеров, проведенных с помощью подводных лодок и специальных датчиков, толщина многолетних льдов сократилась почти вдвое за последние 30 лет. Параллельно происходит значительный сдвиг сроков ледообразования и вскрытия - весеннее таяние начинается в среднем на 5-7 дней раньше, чем в 1980-х годах, а осеннее замерзание запаздывает на 10-14 дней. Эти изменения приводят к увеличению продолжительности безледного периода и существенному сокращению площади многолетних льдов, которые постепенно замещаются сезонными.

1.6. Комплекс причин климатических изменений

Современные изменения арктического климата обусловлены сложным взаимодействием антропогенных и естественных факторов, действующих в различных временных масштабах. Среди главных причин особо выделяется увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере, вызванное человеческой деятельностью, что приводит к усилению парникового эффекта и глобальному потеплению. Существенное влияние оказывают также изменения в океанической циркуляции, особенно увеличение притока теплых атлантических вод в Арктический бассейн. Наряду с антропогенными

факторами продолжают действовать естественные причины климатической изменчивости - колебания солнечной активности, последствия крупных вулканических извержений, внутренняя изменчивость климатической системы. Особую роль в арктическом регионе играют положительные обратные связи, когда уменьшение площади льдов приводит к увеличению поглощения солнечной радиации открытой водной поверхностью и дальнейшему усилению потепления. Этот механизм во многом объясняет столь высокие темпы климатических изменений в Арктике по сравнению с другими регионами планеты.

1.7. Последствия климатических трансформаций

Наблюдаемые в Арктике климатические изменения оказывают комплексное и многообразное воздействие на все компоненты природной среды и человеческую деятельность. Среди физических последствий наиболее значимыми являются деградация многолетней мерзлоты, изменение береговой линии в результате усиления абразионных процессов, таяние ледников и ледяных щитов, трансформация гидрологического режима рек и озер. Экологические последствия включают глубокую трансформацию арктических экосистем, изменение ареалов обитания многих видов, нарушение сложившихся пищевых цепей, появление инвазивных видов, проникающих из более южных районов. Социально-экономические последствия проявляются в изменении условий судоходства, появлении новых рисков для инфраструктуры, построенной на вечной мерзлоте, необходимости адаптации традиционного уклада жизни коренных народов. Эти масштабные изменения требуют глубокого научного понимания и разработки комплексных стратегий адаптации к новым климатическим реалиям, которые уже начали формироваться в арктическом регионе.

2. Формирование опасных явлений в Арктике

2.1. Сильные ветры в арктическом регионе

Арктические ветры представляют собой одно из наиболее распространенных и опасных метеорологических явлений, существенно осложняющих деятельность в регионе. Согласно наставлению [РД 52.04.563-2002 критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения], неблагоприятным ветром считается ветер, скорость которого более 15 м/с. Формирование ветров такой силы связано с комплексом атмосферных процессов, характерных для высоких широт. Особенностью арктических ветров является их внезапность и продолжительность - отдельные шторма могут длиться до 5-7 суток, создавая крайне неблагоприятные условия для судоходства и авиации.

Основной причиной возникновения сильных ветров, представленных в таблице 1, служат глубокие циклоны, формирующиеся на арктическом фронте - границе между холодными арктическими и относительно теплыми воздушными массами умеренных широт. При прохождении таких циклонов скорость ветра нередко достигает 25-30 м/с, а в отдельных случаях превышает 40 м/с. Особенно опасны ветра в прибрежных районах, где они усиливаются за счет орографического эффекта - сужения воздушных потоков между горными массивами и ледниковыми щитами.

Зимой сильные ветры часто сопровождаются метелями и снежными зарядами, которые резко ухудшают видимость. Летом они вызывают сильное волнение на морских акваториях, что особенно опасно для судов, работающих в условиях частичного ледового покрова. Важной особенностью является пространственная неравномерность распределения ветров - наиболее штормовыми районами считаются Баренцево, Карское и Чукотское моря, где повторяемость ветров ≥15 м/с достигает 20-25% дней в году.

Таблица 1 Критерии штормовых ветров.

Сила ветра, баллы	Название ветра	Средние скорости ветра, м/с	Скорость порывов ветра, м/с
0	Штиль	0,0—0,5	1,0
1	Тихий	0,6—1,7	3,2
2	Легкий	1,8—3,3	6,2
3	Слабый	3,4—5,2	9,6
4	Умеренный	5,3—7,4	13,6
5	Свежий	7,5—9,8	17,8
6	Сильный	9,9—12,4	22,2
7	Крепкий	12,5—15,2	26,8
8	Очень крепкий	15,3—18,2	31,6
9	Шторм	18,3—21,5	36,7
10	Сильный шторм	21,6—25,1	42,0
11	Жестокий шторм	25,2—29,0	47,5
12	Ураган	>29,0	>53,0

2.2. Интенсивное брызговое обледенение морских судов

Обледенение судов и сооружений представляет собой особую опасность в арктических условиях. Процесс интенсивного обледенения (≥0,7 мм/час) возникает при сочетании нескольких факторов: отрицательной температуры воздуха (обычно от -2°C до -10°C), высокой влажности и наличия брызг воды. (Рис.3) Такие условия чаще всего наблюдаются в переходные сезоны - осенью и весной, когда температура воздуха уже опустилась ниже нуля, но акватории еще не покрылись сплошным льдом.

Механизм обледенения заключается в замерзании переохлажденных капель воды при их контакте с холодными поверхностями. Наиболее интенсивно процесс идет при ветре 10-15 м/с, когда образуется достаточное количество брызг, но они еще не уносятся слишком быстро. Особую опасность представляет "мокрое" обледенение, когда температура поверхности лишь немного ниже нуля - в этом случае образуется плотный прозрачный лед, создающий наибольшую нагрузку на конструкции.

Для судов критическим считается нарастание льда со скоростью более 0,7 мм/час - при таких темпах за сутки может образоваться слой льда толщиной 15-20 мм, что эквивалентно дополнительной нагрузке в несколько десятков тонн. Это приводит к смещению центра тяжести, уменьшению остойчивости и в крайних случаях - к опрокидыванию судна. Истории известны несколько случаев гибели рыболовных судов именно по этой причине, особенно в Баренцевом и Охотском морях.

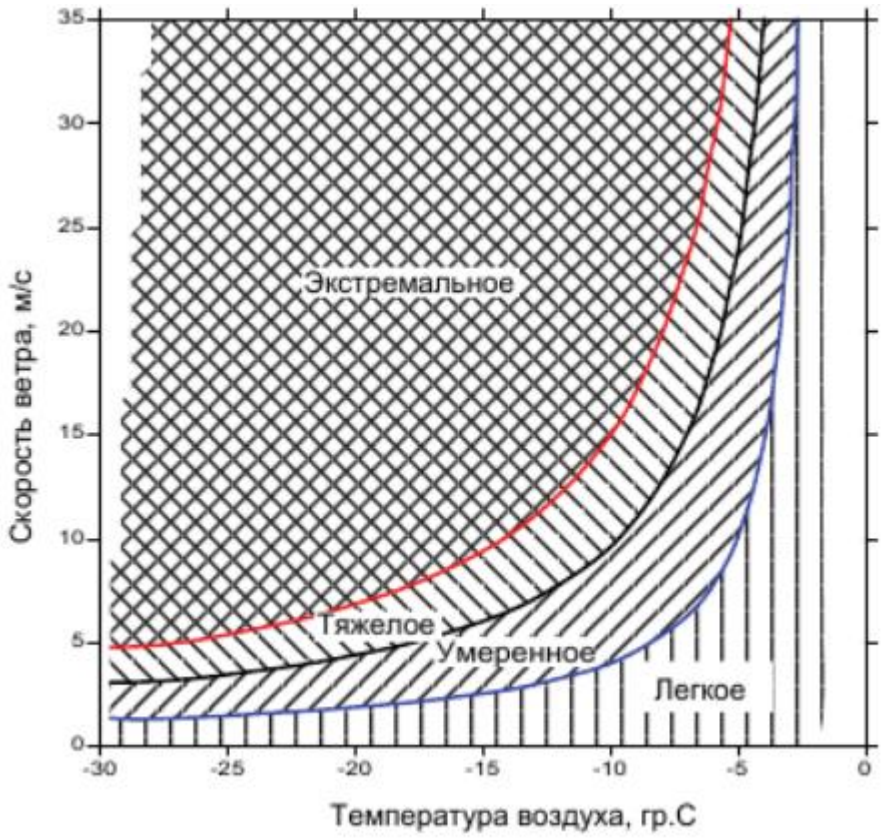

Рисунок 2 Критерии обледенения при температуре воды 0°C и температуре замерзания –1°C

2.3. Высокое волнение

Формирование высоких волн в Арктике имеет свои специфические особенности по сравнению с другими регионами мирового океана. Волны высотой ≥4 м представляют серьезную опасность для судоходства, особенно в сочетании с другими неблагоприятными факторами - низкой температурой, обледенением или наличием плавающих льдин.

Основными факторами, способствующими образованию высоких волн, являются:

1) большая продолжительность ветра (не менее 10-12 часов);

2) значительная длина разгона (расстояние, на котором ветер воздействует на водную поверхность);

3) скорость ветра ≥15 м/с.

Особенностью арктических штормов является их внезапность и быстрое развитие. В условиях частичного ледового покрова картина волнения становится особенно сложной - участки открытой воды чередуются с ледовыми полями, что приводит к неравномерному распределению волновой энергии. При этом лед оказывает демпфирующее воздействие на волны, уменьшая их высоту, но увеличивая крутизну, что делает их особенно опасными для судов.

Наибольшие высоты волн наблюдаются в конце лета - начале осени, когда площадь льдов минимальна, а циклоническая активность возрастает. В Баренцевом море максимальные зарегистрированные высоты волн достигают 10-12 м, в Карском - 8-10 м. При этом следует учитывать, что в условиях низких температур физическое воздействие волн на корпус судна усиливается из-за повышения хрупкости металла.

2.4. Комплексное воздействие опасных явлений

Особую опасность представляет сочетание нескольких опасных явлений одновременно. Наиболее критичными являются ситуации, когда сильный ветер сопровождается интенсивным обледенением и высоким волнением. Такие условия создают экстремальную нагрузку на суда и значительно повышают риск аварийных ситуаций.

Анализ аварийности в арктических морях показывает, что около 60% тяжелых инцидентов происходит именно при одновременном воздействии нескольких опасных явлений. Например, обледенение в сочетании с качкой значительно затрудняет работу экипажа на палубе, а сильный ветер осложняет маневрирование при наличии плавающих льдин.

Изменение климата вносит свои коррективы в характер опасных явлений. Увеличение продолжительности безледного периода приводит к росту повторяемости высоких волн, а более частые переходы температуры через ноль способствуют увеличению случаев обледенения. Эти тенденции необходимо учитывать при планировании арктических экспедиций и разработке мер безопасности.

3. Прогнозирование и методы противодействия опасным явлениям в Арктике

3.1. Современные методы прогнозирования опасных явлений

Прогнозирование опасных метеорологических явлений в Арктике – сложная научно-практическая задача, требующая комплексного подхода. Для предсказания сильных ветров применяют сочетание численных моделей атмосферы, спутниковых данных и наземных наблюдений. Специализированные модели, такие как COSMO и HIRLAM, адаптированы к арктическим условиям и обеспечивают прогноз скорости ветра с заблаговременностью до 5–7 суток. Особую сложность представляют полярные мезоциклоны – компактные, но мощные вихри, способные вызывать внезапные штормовые ветры. [https://method.meteorf.ru/norma/document/treb2009.pdf]

Прогноз обледенения строится на основе специализированных алгоритмов, учитывающих температуру воздуха и воды, скорость ветра, влажность и соленость морской поверхности. Одной из наиболее эффективных систем является IFS (Ice Forecasting System), разработанная норвежскими метеорологами. Она использует радиолокационные измерения с судов и буев, а также данные инфракрасных спутниковых сенсоров, обеспечивая точность прогноза интенсивности обледенения до 0,1 мм/ч.

Для прогнозирования высоты волн применяют волновые модели, такие как WAM и SWAN, которые учитывают взаимодействие волн с кромкой льда. В последние годы активно развиваются методы анализа больших массивов исторических данных, позволяющие выявлять закономерности формирования опасного волнения и повышать точность прогнозов. Для прогноза обледенения применяются специализированные алгоритмы, учитывающие температуру воздуха и воды, скорость ветра, влажность и соленость морской поверхности. Наиболее эффективной считается система IFS (Ice Forecasting System), разработанная норвежскими метеорологами. Она использует данные

радиолокационных измерений с судов и буев, а также показания инфракрасных спутниковых сенсоров, позволяя прогнозировать интенсивность обледенения с точностью до 0,1 мм/час.

Прогнозирование высоты волн основано на волновых моделях типа WAM и SWAN, которые учитывают взаимодействие волн с кромкой льда. В последние годы активно внедряются системы, использующие искусственный интеллект для анализа больших массивов исторических данных и выявления закономерностей в формировании опасного волнения.

3.2. Технологии защиты от сильных ветров

Для минимизации последствий сильных ветров в арктическом судоходстве применяется комплекс организационных и технических мер. Современные суда ледового класса оснащаются усовершенствованными системами динамического позиционирования, позволяющими удерживать курс даже при штормовом ветре. Важную роль играет правильное балластирование судна, снижающее его парусность.

На этапе планирования рейсов используется система маршрутного прогнозирования, позволяющая выбирать оптимальный путь с учетом прогноза ветров. В критических ситуациях капитаны могут воспользоваться специально оборудованными зонами укрытия вдоль Северного морского пути, где рельеф береговой линии обеспечивает естественную защиту от ветра.

Для стационарных сооружений (буровых платформ, метеостанций) применяются аэродинамические конструкции, уменьшающие ветровую нагрузку, и системы активного демпфирования колебаний.

3.3. Методы борьбы с обледенением

Современные технологии противодействия обледенению судов и морских сооружений в арктических условиях достигли значительного прогресса за последние десятилетия. Наиболее распространенными остаются тепловые системы, использующие подогрев критических элементов конструкции горячей водой или электрическими нагревателями. Эти системы особенно эффективны для защиты винторулевой группы, леерных ограждений и палубного оборудования. Более инновационным подходом являются вибрационные системы, которые устанавливаются на мачтах и надстройках - они генерируют высокочастотные колебания, предотвращающие накопление льда. Химические методы предполагают использование специальных антиобледенительных гелей и покрытий, создающих на поверхности тонкую пленку, препятствующую адгезии льда. Особое внимание уделяется пассивным методам защиты, включающим аэродинамическое проектирование надстроек, применение материалов с низкой адгезионной способностью и специальных гидрофобных покрытий. В последние годы активно развиваются "умные" антиобледенительные системы, которые автоматически активируются при достижении критических параметров температуры, влажности и скорости ветра, что позволяет значительно экономить энергоресурсы судна.

3.4. Способы минимизации воздействия высоких волн

Защита судов от опасного волнения в арктических условиях требует комплексного подхода, сочетающего конструктивные особенности и оперативные методы управления. Современные суда ледового класса оснащаются усиленной носовой частью и специальными скуловыми килями, которые значительно уменьшают амплитуду качки. Важным элементом являются системы активной стабилизации, использующие гироскопические или гидравлические демпферы для гашения колебаний. В эксплуатационной

практике капитаны используют данные точных прогнозов волнения для выбора оптимального маршрута, регулируют скорость и курс судна относительно направления волны, что позволяет минимизировать ударные нагрузки на корпус. Перспективным направлением считаются гибкие носовые обтекатели, которые изменяют свою форму в зависимости от характеристик волнения, а также динамические балластные системы, автоматически перераспределяющие вес судна для повышения устойчивости. Особое значение имеет подготовка экипажей, включающая регулярные тренировки на специализированных тренажерах, моделирующих поведение судна в штормовых условиях различной интенсивности.

3.5. Комплексные системы безопасности

Современный подход к обеспечению безопасности в Арктике предполагает интеграцию всех перечисленных методов в единые системы управления рисками. Такие системы, как ARCSAFE (Arctic Safety and Forecasting Environment), объединяют данные прогнозирования, информацию о техническом состоянии судна и рекомендации по оптимальным действиям в реальном времени.

Перспективным направлением является создание "цифровых двойников" судов, позволяющих моделировать их поведение в различных погодных условиях и заранее отрабатывать действия экипажа при возникновении опасных ситуаций. Эти технологии, сочетаемые с постоянным совершенствованием нормативной базы и международных стандартов арктического судоходства, позволяют существенно снизить риски, связанные с опасными природными явлениями в высоких широтах. [https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293724/4293724607.pdf]

4. Анализ данных по ветровому режиму в районе СМП

4.1 Обработка полученных данных по району СМП

Для проведения исследования ветрового режима, был выбран Северный Морской Путь(рис.3) так, как он является экономически важным путем для России и международных перевозках.

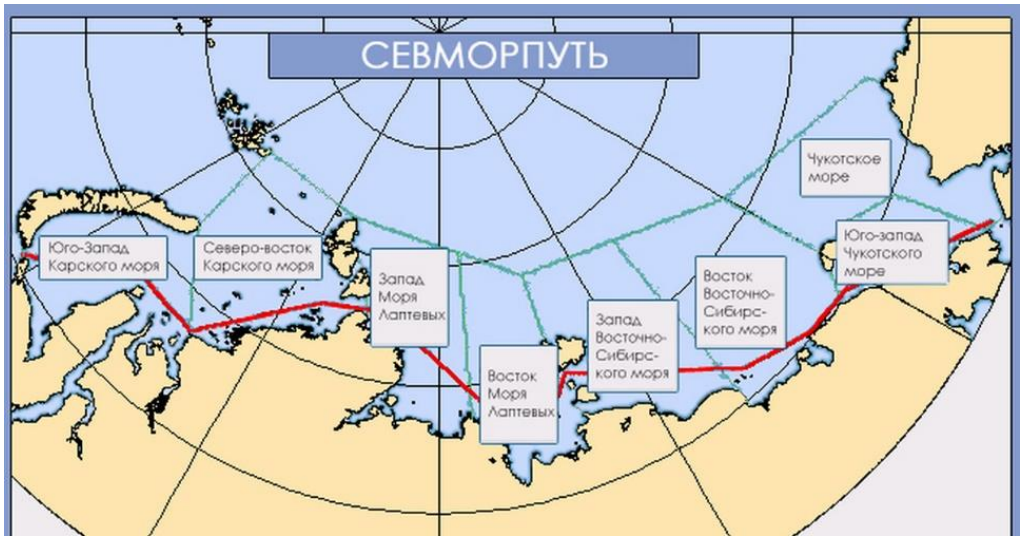

Рисунок 3 Карта Северного Морского Пути.

Для формирования базы данных, в качестве исходных данных были использованы материалы реанализа ERA5, в узлах регулярной сетки 1 градус по широте и долготе, предоставляющие подробную информацию о метеорологических параметрах на всем протяжении рассматриваемого маршрута. Период наблюдений составил 25 лет, с 2000 года по 2024 год

После приведения исходных баз данных к удобному и структурированному формату, был выполнен этап их детальной обработки с использованием программного обеспечения Microsoft Access. Были определены границы каждого моря (Баренцево, Карское, море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское) по их географическим координатам. В следствии чего были сопоставлены каждые точки наших измерений с конкретным морем, используя эти координатные границы. Далее в рамках

данного этапа проводился отбор и систематизация значений скорости ветра, соответствующих заданным географическим координатам вдоль исследуемого маршрута в близлежащих точках, а также их привязка к соответствующим временным отметкам. Это позволило получить упорядоченный массив данных, содержащий необходимые метеорологические параметры для дальнейшего анализа.

Помимо данных о скорости ветра, в ходе обработки информации в Microsoft Access были также получены и систематизированы сведения о направлениях ветра в ключевых точках маршрута. Полученные массивы данных по направлению ветра были соотнесены с временными периодами, что позволит выявить преобладающие направления ветров по всей трассе Северного Морского Пути.

В рамках углубленного анализа особое внимание уделялось случаям экстремальных ветровых условий. С использованием инструментов Microsoft Access был выполнен отбор данных, при которых скорость ветра превышала критическое значение 15 м/с. Подобные метеорологические условия классифицируются как неблагоприятные для судоходства, поскольку могут вызывать значительный крен судов, создавая потенциальные риски для безопасности мореплавания.

Для каждого выявленного случая экстремального ветра дополнительно фиксировались:

- соответствующее направление воздушного потока
- географическая привязка (координаты)
- временные характеристики (дата и продолжительность явления)

Полученная выборка позволила проанализировать пространственно-временное распределение опасных ветровых явлений вдоль Северного Морского Пути, что имеет важное значение для разработки рекомендаций по оптимальному планированию арктических рейсов.

На следующем этапе обработки все полученные метеорологические данные - включая значения скорости ветра, превышающие критический порог в 15 м/с, и соответствующие направления ветров - были систематизированы и привязаны к конкретным морским акваториям, входящим в зону исследования Северного Морского Пути.

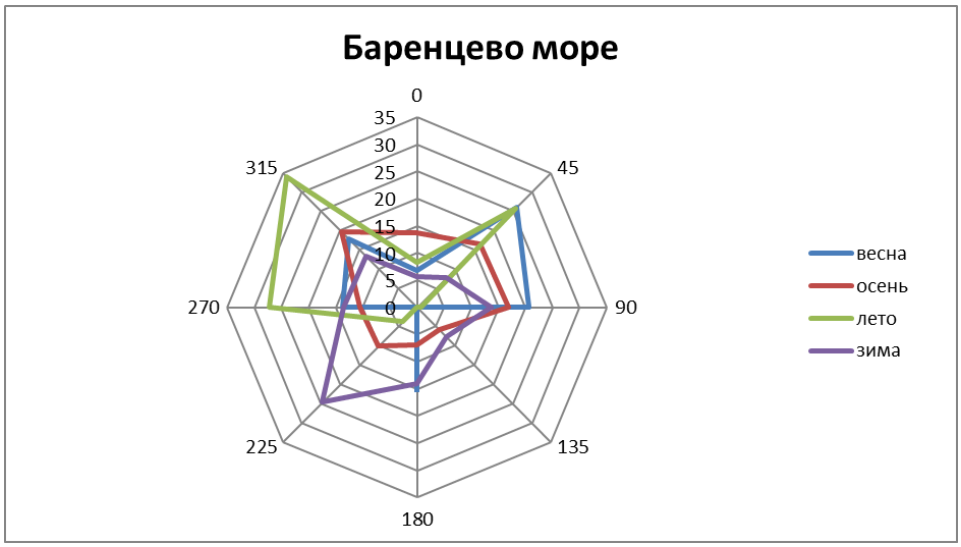

Рисунок 4 Основные направления ветра в акваториях морей при скорости ветра 15 м/с и более в Баренцево море.

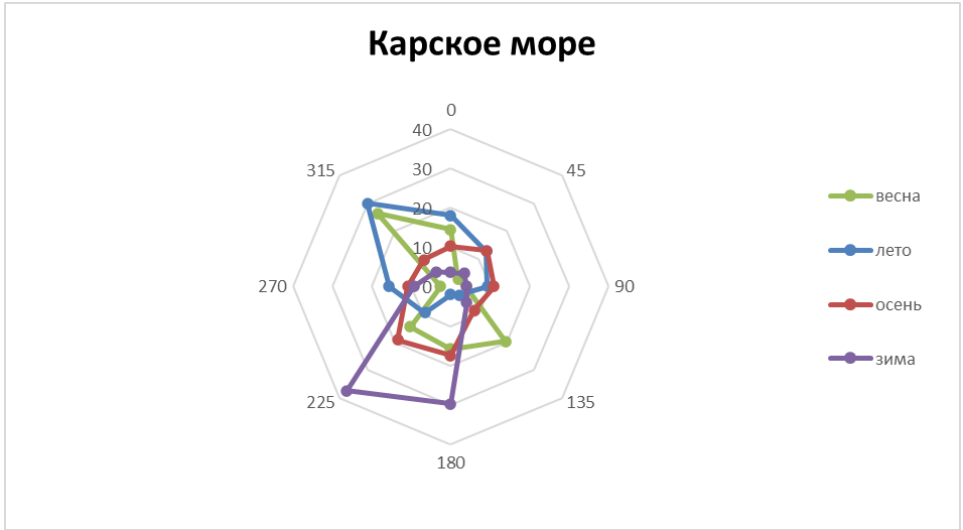

Рисунок 5 Основные направления ветра в акваториях морей при скорости ветра 15 м/с и более в Карском море

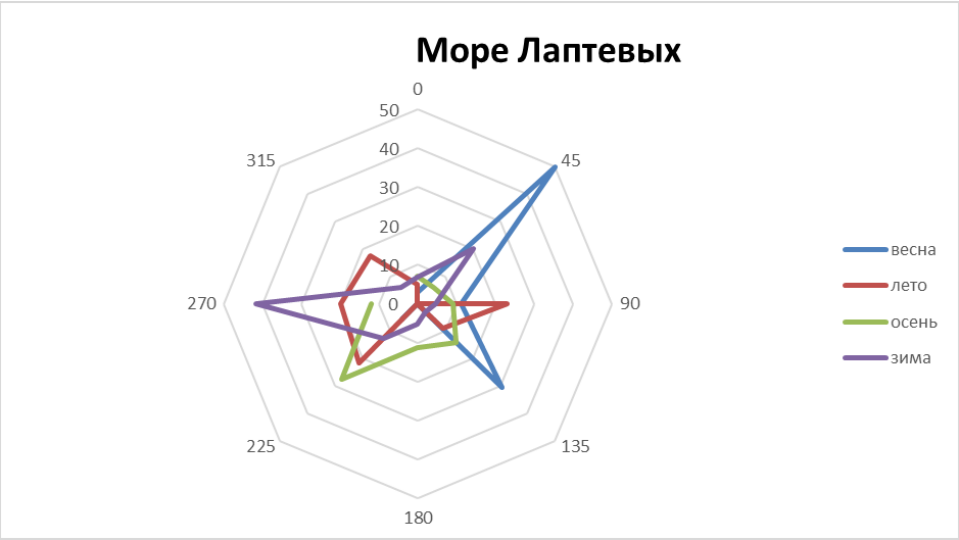

Рисунок 6 Основные направления ветра в акваториях морей при скорости ветра 15 м/с и более в море Лаптевых.

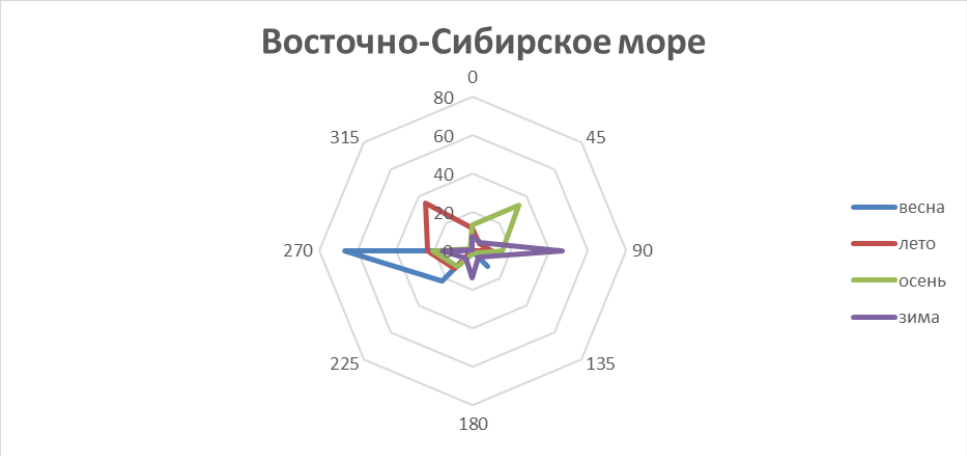

Рисунок 7 Основные направления ветра в акваториях морей при скорости ветра 15 м/с и более в Восточно-Сибирском море

Рисунок 8 Основные направления ветра в акваториях морей при скорости ветра 15 м/с и более в Чукостком море

Проанализировав направления ветра, видно что зимой в Арктике преобладают циклоны, вызывающие устойчивые западные и северо-западные ветры (стоковые ветра с материка).

Летом арктические циклоны ослабевают, и тут начинают преобладать антициклоны, которые приносят восточные и юго-восточные ветры.

Также, на направление ветра будет влиять рельеф. Так, например, в Баренцево море из-за его открытости преобладают западные ветры, а вот море Лаптевых закрыто горами и архипелагами, и там преобладают северо-восточные ветра.

Для каждой выделенной морской зоны (Баренцево море, Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Чукотское море) были сформированы индивидуальные базы данных, содержащие:

1. Пространственно-временные характеристики опасных ветровых явлений
2. Распределения скоростей и направлений ветров по акваториям морей
3. Частота возникновения неблагоприятных условий.

После того как мы собрали и обработали все данные, у нас получилась одна общая база, в которой были координаты, скорость ветра, направления и даты измерений.

Теперь у нас есть понятная таблица, где каждая строчка — это отдельное измерение. В столбцах указано: где именно замеряли ветер (координаты), какая была скорость, откуда дул ветер (направление) и когда это было (дата и время).

4.2 Расчет повторяемости неблагоприятных ветров и их продолжительность.

Далее мы рассчитали среднемесячную продолжительность неблагоприятных ветровых условий на каждом участке Северного морского пути в каждый месяц, оценки повторяемости неблагоприятных ветров.Для этого мы воспользовались массивом данных реанализа ERA за каждый час. Затем мы посчитали среднюю продолжительность ветров 15 м/с и свыше в каждом месяце навигационного периода. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 Среднемесячная продолжительность штормового ветра по морям Российской Арктики

2000-2024	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Баренцево	25,2	18,8	16,4	6,4	5,6	1,3	2,0	2,5	9,5	16,3	20,5	24,6
Карское	13,0	7,6	6,4	4,1	3,6	1,9	0,7	1,2	4,0	7,6	19,8	11,3
Лаптевых	3,6	1,6	1,9	2,5	1,8	1,0	0,2	1,2	2,5	2,4	19,1	5,5
Восточно-Сибирское	1,7	2,6	1,2	0,8	0,4	0,6	0,1	0,6	1,1	3,4	18,5	4,5
Чукотское	12,6	8,3	4,3	1,3	0,6	0,1	0,3	0,7	0,9	6,2	18,0	18,6

Полученные данные были оформлены в виде таблицы и показали, что в Баренцевом море средняя продолжительность штормовых ветров составляет 20-25 часов в зимние месяцы, уменьшаясь до 3-6 часов летом. В Карском

море этот показатель достигает 14-20 часов зимой, а летом 1-2 часа. Наименьшая продолжительность была выявлена в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море, где самая большая продолжительность составляет не более 19 часов в ноябре, а в остальных месяцах не превышает 5 часов. Из расчетов видно, что летом продолжительность уменьшается, что связано с ослаблением деятельности глубоких циклонов в акватории СМП. Также была составлена «карта продолжительности» ветров по акваториям для визуального анализа. (Приложение А.)

Эти расчеты помогли нам выявить сезонные и региональные особенности ветрового режима, что крайне важно для планирования безопасных маршрутов и составления рекомендаций для судоходных компаний.

Для анализа динамики изменения продолжительности штормовых ветров мы провели сравнение двух десятилетних периодов (2005-2014 гг. и 2015-2024 гг.), используя ранее подготовленные данные. Из общей базы были отобраны соответствующие временным рамкам случаи с ветром 15 м/с и более, включая среднемесячные показатели продолжительности и географическую привязку к конкретным морям. Основной метод анализа заключался в попарном сравнении табличных данных между периодами – значения второго периода вычитались из первого, что позволило получить разностные показатели по каждому параметру. Результаты представлены в таблицах 3-4.

Таблица 3 Продолжительность неблагоприятного ветра в период с 2005 по 2014 гг.

2005-2014	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Баренцево	18,9	19,0	13,9	5,5	6,5	1,2	3,8	2,2	10,8	16,8	21,9	26,9
Карское	13,8	10,0	5,7	5,3	4,3	1,9	1,0	0,5	3,7	7,2	9,4	11,6
Лаптевых	4,9	2,3	2,5	5,1	2,1	0,4	0,2	1,5	1,9	2,6	4,4	6,2
Восточно-Сибирское	2,6	0,8	1,5	1,3	0,0	0,6	0,1	0,5	0,5	2,4	3,3	4,1
Чукотское	9,7	11,7	2,4	1,7	0,5	0,1	0,3	0,7	1,1	4,6	13,2	21,8

Таблица 4 Продолжительность неблагоприятного ветра в период с 2015 по 2024 гг.

2015-2024	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Баренцево	30,9	15,9	15,5	6,9	5,1	1,3	1,2	3,8	9,3	16,0	19,3	22,6
Карское	16,3	6,7	5,8	2,9	3,8	1,8	0,6	2,5	5,6	8,3	8,7	9,0
Лаптевых	2,6	1,5	1,7	0,6	2,2	1,4	0,3	1,3	2,9	1,9	2,4	3,0
Восточно-Сибирское	0,9	5,4	1,1	0,6	0,3	0,6	0,0	0,9	1,8	5,1	4,6	4,0
Чукотское	10,8	5,3	8,0	1,0	1,2	0,2	0,3	0,9	0,9	7,5	13,5	19,6

Таблица 5 Тенденция изменения продолжительности неблагоприятного ветра (15 м/с и более)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Баренцево	12,1	-3,0	1,6	1,4	-1,5	0,1	-2,5	1,6	-1,6	-0,9	-2,6	-4,3
Карское	2,5	-3,4	0,2	-2,4	-0,4	0,0	-0,5	2,0	1,9	1,2	-0,7	-2,6
Лаптевых	-2,3	-0,7	-0,8	-4,5	0,1	1,0	0,1	-0,2	1,1	-0,7	-1,9	-3,2
Восточно-Сибирское	-1,6	4,6	-0,4	-0,7	0,2	0,0	-0,1	0,4	1,3	2,8	1,3	-0,1
Чукотское	1,2	-6,4	5,6	-0,7	0,7	0,1	0,0	0,2	-0,1	2,9	0,4	-2,2

Особое внимание уделялось оценке знака (табл. 5) и величины этих различий: положительные значения указывали на увеличение продолжительности штормов, отрицательные – на сокращение. Анализ проводился с детализацией по месяцам и морским бассейнам, что выявило пространственно-временные закономерности изменений. Полученные результаты анализа убедительно демонстрируют устойчивую тенденцию к увеличению продолжительности штормовых ветров на большинстве участков Северного морского пути, в частности в осенние периоды. Это явление напрямую связано с наблюдаемым повышением температуры воздуха и температуры поверхности моря в акватории Русской Арктики. В летний период также увеличивается продолжительность штормовых ветров в акваториях моря Лаптевых и Чукотском море.

4.3 Анализ ветрового режима на основе полученных данных.

Проведенный анализ ветрового режима Северного морского пути выявил существенные различия в характеристиках ветра для различных участков трассы, обусловленные их географическими особенностями. Наибольшую сложность для судоходства представляет Баренцево море, где

зафиксирована максимальная продолжительность штормовых ветров по сравнению с другими морями СМП. Это объясняется его открытостью для атлантических циклонов и интенсивным теплообменом между теплыми водами Гольфстрима и холодным арктическим воздухом.

Важным результатом исследования стало выявление тенденции к увеличению продолжительности штормовых ветров на участках СМП. Наиболее значительный рост (на 1,5-2 часа за последние 10 лет) отмечен именно в Баренцевом море. Эти изменения связаны с комплексом факторов, включая повышение температуры поверхности моря, сокращение ледового покрова и трансформацию атмосферной циркуляции в Арктическом регионе.

Полученные данные имеют важное практическое значение для обеспечения безопасности судоходства. Они указывают на необходимость дополнения существующих нормативов, усовершенствования специальных рекомендаций для прохождения сложных участков и учета выявленных тенденций при проектировании новых судов арктического класса. Особое внимание должно быть уделено Баренцеву морю как району с наиболее экстремальными ветровыми условиями на всем протяжении Северного морского пути.

5. Брызговое обледенение судов.

5.1 Вычисление брызгового обледенению по методу Д. Оверлэнда.

Для анализа опасного явления брызгового обледенения судов в акватории Северного морского пути в период с 2000 по 2016 гг., был выбран метод Оверлэнда, для которого была собрана комплексная база данных на основе реанализа ERA5, включающая четыре ключевых параметра: температуру поверхности моря, температуру воздуха и скорость ветра в заданных координатах СМП, для вычисления так называемого параметра обледенения PPR: Соленость из атласа WOA2023 (Левитус) [https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-atlas-2023/]

Формула 1 Параметр обледенения PPR

$$PPR = \frac{V(T_f - T_a)}{1 + 0{,}3(T_w - T_f)}.$$

Где V-скорость ветра(м/с), Tf-температура замерзания воды, Ta-температура воздуха, Tw-температура воды.

После форматирования данных, с помощью Access, проводились расчёты нужных нам параметров. Для начала нужно было посчитать температуру замерзания воды. Для этого нам требовалась солёность воды. Выбрав данные, мы рассчитали температуру замерзания и после этого рассчитали параметр PPR.

Формула 2 Температура замерзания воды

$$T_f = -0{,}0575S + 0{,}001710523S^{\frac{3}{2}} - 0{,}0002154996S^2.$$

Теперь когда все составляющие были известны, мы рассчитали сам параметр PPR. Согласно наставлению по навигации и гидрографии №31[https://gningi.ru/images/journal/nig31.pdf] опасным называют обледенение

начиная от умеренного (при значениях показателя обледенения 22,4 и более), которое влечет за собой серьезные угрозы для судохоства.

Таблица 6 Интенсивность и скорость обледенения в зависимости от показателя обледенения.

PPR	<0	0–22,4	22,4–53,	53,3–83,0	>83,0
Обледенение	нет	легкое	умеренное	тяжелое	экстремальное
Скорость роста толщины льда, см/час	0	<0,7	0,7–2,0	2,0–4,0	>4,0

5.2 Расчет повторяемости брызгового обледенения.

Далее, с помощью базы Access, была сделана привязка брызгового обледенения к точкам координат, для изучения повторяемости. Для этого была сделана выборка по количеству случаев за выбранный временной период, выбирался год, точка координаты и количества случаев. Для оценки повторяемости, считалась процентная составляющая случаев опасного обледенения. Количество случаев наблюдения опасного умеренного брызгового обледенения мы делили на общее количество всех случаев наблюдения брызгового обледенения и умножали на 100%. В результате была сформирована таблица повторяемости по годам (таблица 7). Также были сделаны графики годового хода повторяемости. (рис.9-13) Можно сделать выводы, что:

-В Баренцево море большая повторяемость наблюдается в зимний период, когда преобладают очень низкие температуры воздуха и воды, с потеплением эти значения уменьшаются весной, а летом и во все равны нулю

- В Карском море большая повторяемость будет наблюдаться с октября по декабрь. Учитывая, что большую часть года море покрыто льдами, то наблюдать обледенение мы сможем наблюдать с летнего периода и до наступления ледостава.

-в Чукотском, Восточно-Сибирском и морях Лаптевых можно увидеть, что обледенение наблюдается только осенью, почти в течении всего года акватории покрыты льдами.

Рисунок 9 Годовой ход повторяемости опасного брызгового обледенения в Баренцево море.

Рисунок 10 Годовой ход повторяемости опасного брызгового обледенения в Карском море.

Рисунок 11 Годовой ход повторяемости опасного брызгового обледенения в море Лаптевых

Рисунок 12 Годовой ход повторяемости опасного брызгового обледенения в Восточно-Сибирском море.

Рисунок 13 Годовой ход повторяемости опасного брызгового обледенения в Чукотском море.

Таблица 7 Среднегодовые повторяемости брызгового обледенения по морям.

год	Баренцево	Восточно-Сибирское	Карское	Лаптевых	Чук
2000	20,3	18,8	21,2	17,9	18,5
2001	20,8	27,8	14,9	33,9	22,7
2002	26,1	10,2	23,4	22,8	9,2
2003	21,1	10,4	23,6	17,1	6,9
2004	20,7	17,6	20,7	31,5	8,2
2005	16,9	6,3	10,6	12,2	7,6
2006	18,3	9,6	21,1	15,4	2,0
2007	12,6	4,6	6,6	11,8	2,4
2008	9,0	11,8	10,8	16,8	11,0
2009	22,2	9,3	8,3	7,2	7,5
2010	21,4	9,0	11,6	11,1	4,4
2011	14,0	5,8	4,8	6,4	7,8
2012	12,1	7,4	6,0	6,8	8,3
2013	17,1	21,6	18,7	13,2	11,0
2014	16,4	5,9	16,4	9,0	0,3
2015	14,8	8,9	9,4	12,7	5,0
2016	13,5	2,8	4,2	8,8	3,5

Далее построены графики среднегодовой повторяемости опасного обледенения с линейными трендами по отдельным морям, на которых мы видим, что в большинстве случаев идет тенденция на уменьшение количества случаев брызгового обледенения. Для проверки значимости тренда этой тенденции, был использован критерий Фишера. Тренд будет считаться значимым, если критерий $F > F_{кр.}$. Расчеты критериев для каждой акватории морей показали, что тренд значимый для всех 5 акваторий, то есть в последнее время наблюдается тенденция на уменьшение количества случаев брызгового обледенения. Скорее всего, это связано, не с ослаблением ветра, а увеличением температур в морях Арктики.

5.3 Анализ повторяемости брызгового обледенения.

Анализ данных по брызговому обледенению судов на Северном морском пути позволил выявить чёткие сезонные закономерности для каждого арктического моря. В Баренцевом море, являющемся самым западным участком СМП, наибольшее количество случаев обледенения

фиксируется в зимние месяцы, когда частые атлантические циклоны приносят штормовые ветра со скоростью 14-18 м/с в сочетании с температурами воздуха -12...-18°C. Карское море демонстрирует свои пики с октября по декабрь где критическими факторами становятся экстремально низкие температуры (-20...-25°C) при умеренных ветрах 10-12 м/с.[Атлас Арктики (1985 г., главный редактор — А.Ф. Трёшников)] В трех остальных морях наблюдается меньшее количества случаев. Это связано с тем, что расчет обледенения невозможен, из-за наличие большого количества воды, покрытой льдом в этих акваториях (нет данных о солености моря). Поэтому основная часть обледенения приходится на осень, когда еще акватории не скованы льдом, и появляются первые значения низких температур.

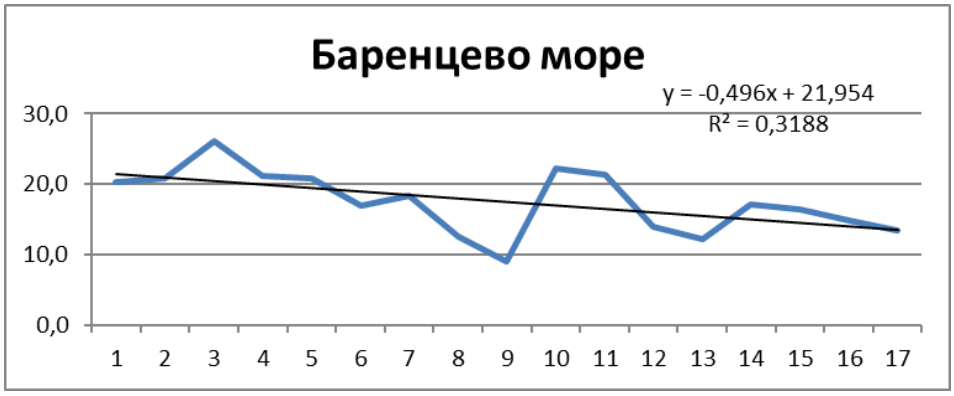

Рисунок 14 график среднегодовой повторяемости опасного обледенения в Баренцево море с линейным трендом.

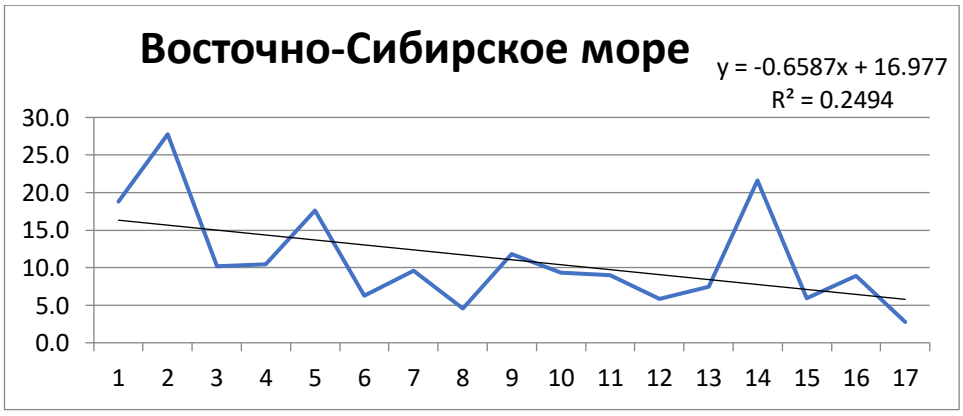

Рисунок 15 график среднегодовой повторяемости опасного обледенения в Восточно-Сибирском море с линейным трендом.

Рисунок 16 график среднегодовой повторяемости опасного обледенения в Карском море с линейным трендом.

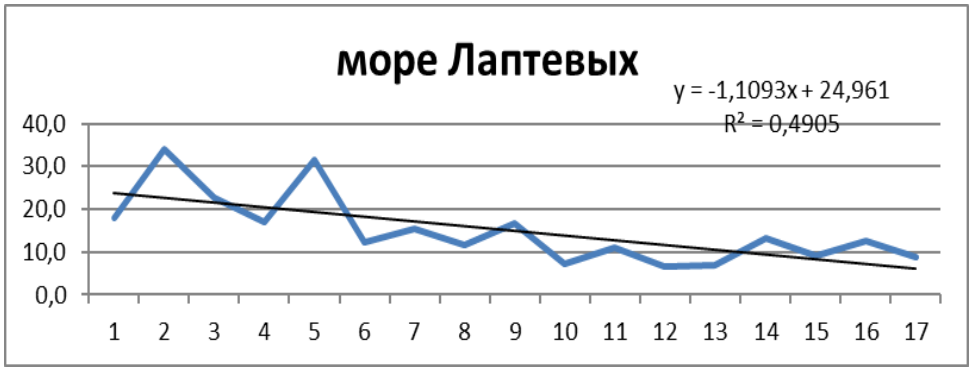

Рисунок 17 график среднегодовой повторяемости опасного обледенения в море Лаптевых с линейным трендом.

Рисунок 18 график среднегодовой повторяемости опасного обледенения в Чукотском море с линейным трендом.

Анализируя графики среднегодовой повторяемости с трендом, выявлена устойчивая тенденция к сокращению случаев брызгового обледенения. Это открывает новые возможности для совершенствования системы безопасности арктического судоходства. Полученные данные позволяют пересмотреть существующие нормативы по борьбе с

обледенением, сделав их более адаптивными к современным климатическим условиям. В частности, появилась возможность уточнить рекомендации по: выбору оптимальных маршрутов с учётом сезонной и региональной специфики обледенения; режимам работы судов в опасных условиях; использованию современных средств защиты от обледенения. Особое значение имеет возможность более точного прогнозирования опасных периодов, что позволяет операторам заблаговременно планировать маршруты и графики движения судов, минимизируя риски. Однако, несмотря на общую положительную тенденцию, сохраняется необходимость поддержания высокого уровня готовности к борьбе с обледенением, особенно в восточных районах СМП и в период поздней зимы - ранней весны, когда вероятность опасных ситуаций остаётся существенной. Полученные результаты уже сегодня могут быть использованы для оптимизации системы управления рисками при арктическом судоходстве.

6. Волновой режим в акваториях СМП.

6.1 Обработка данных ветро-волнового режима.

Для оценки характеристик ветрового и волнового воздействия в районах Северного морского пути (СМП) были использованы данные реанализа ERA5, обеспечивающего глобальный охват с высоким пространственно-временным разрешением. В ходе исследования учитывались два ключевых параметра:

1. Высота волн – как основной индикатор степени волнового воздействия.
2. Скорость ветра – фактор, напрямую влияющий на генерацию волнения.

На первом этапе анализа было определено общее количество случаев волнения в исследуемой акватории за выбранный временной период. Далее из общего массива данных были отфильтрованы случаи опасного волнения, соответствующие заданным критериям (например, высота волны ≥ 3 м или комбинированные условия по волнению и ветру).

При проведении анализа опасного волнения в арктическом регионе был использован дифференцированный подход к определению критериев опасности, сочетающий нормативные требования и практические исследовательские задачи. Согласно официальному наставлению (РД 52.27.881-2019.), критическим значением высоты волны, представляющим непосредственную угрозу для судоходства, установлен порог в 4 метра для прибрежной зоны и 6 метров для открытой акватории. Этот установленный критерий относится к используемой в нашей стране высоте волны 3% обеспеченности. За рубежом пользуются другой характеристикой - значительной высотой волны (или высотой волны 13% обеспеченности). Разница межу этими высотами около 30%, при этот высота волны 3% обеспеченности выше значительной. Таким образом, опасные 4 метра по массиву значительных высот волн, который используется в данной работе, понижается до 3м. Этот норматив основан на инженерных расчетах

устойчивости судовых конструкций и многолетних наблюдениях за последствиями воздействия волновой нагрузки на морские суда.

По аналогии с анализом ветра и обледенения данные по волнению были структурированы по географическому принципу с группировкой по отдельным морям Северного морского пути (Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) и по временным периодам (месяцам и годам наблюдений).

6.2 Расчет повторяемости опасного волнения.

Для каждого моря и временного периода были рассчитаны показатели повторяемости волнения.

Далее был проведён расчёт повторяемости случаев опасного волнения по всей акватории Северного морского пути с высотой волны, превышающей установленный критический порог (3 метра), ко всем выделенным географическим зонам - Баренцеву, Карскому, морям Лаптевых, Восточно-Сибирскому и Чукотскому, а также к различным временным интервалам (месячным, и двум 10-летним периодам). Результаты расчётов наглядно продемонстрировали существенные региональные различия в повторяемости опасных волновых условий. Наибольшие значения, достигающие 15-20% в отдельные месяцы, были зафиксированы в Баренцевом и Чукотском морях, что полностью согласуется с их гидрометеорологическими особенностями - продолжительным безлёдным периодом и значительной подверженностью штормовым воздействиям. В центральных арктических морях, таких как море Лаптевых, этот показатель не превышал 5-7% из-за сдерживающего влияния ледового покрова. Особый интерес представляет выявленная сезонная динамика с чётко выраженным пиком в зимние месяцы, когда

активность циклонов возрастает. Полученные процентные показатели были систематизированы в сводной таблице.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Баренцево	15,8	16,4	14,7	5,8	2,9	1,3	1,1	1,5	4,6	9,9	12,8	15,8
Карское	4,8	13,4	2,1	2,0	1,4	0,1	0,3	0,5	1,4	3,8	5,2	12,0
Лаптевых				0,0	0,1	0,0	0,2	0,6	1,3	1,3		
Восточно-Сибирское					0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	1,0	4,7	8,5
Чукотское	15,6	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	1,1	6,3	14,6	22,8

Таблица 10 Повторяемость опасных волнений по морям

Для анализа динамики изменения повторяемости опасных волнений было проведено сравнение двух десятилетних периодов: 2005-2014 и 2015-2024 годов. Такой временной интервал был выбран для наглядного отображения возможных изменений в частоте возникновения экстремальных волновых условий. Расчеты проводились отдельно для каждого выделенного географического района СМП с использованием ранее полученных данных о процентной повторяемости.

2005-2014	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Баренцево	12,0	19,8	11,7	4,5	3,4	1,4	1,5	1,2	6,6	8,5	12,4	16,3
Карское	0,9	14,3	0,0	0,0	0,4	0,2	0,4	0,3	1,4	3,6	11,2	6,6
Лаптевых				0,0	0,0	0,0	0,1	0,8	1,0	1,0		
Восточно-Сибирское					0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,7	2,9	5,0
Чукотское					0,0	0,0	0,1	0,2	1,4	5,1	10,3	15,4

Таблица 11 Повторяемость опасного волнения в период с 2005 по 2014 гг.

2015-2024	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Баренцево	17,3	13,3	48,2	10,1	3,0	1,9	1,1	2,0	3,8	9,1	11,7	14,2
Карское	8,3	0,0	24,3	0,1	1,2	0,1	0,2	1,0	2,2	3,7	8,1	12,4
Лаптевых				0,0	0,6	0,0	0,3	0,6	1,5	1,5		
Восточно-Сибирское					0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	1,5	2,8	4,1
Чукотское					0,0	0,0	0,1	0,7	0,7	5,0	9,4	13,8

Таблица 12 Повторяемость опасного волнения в период с 2015 по 2024 гг.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Баренцево	5,2	-6,5	36,5	5,6	-0,4	0,4	-0,4	0,8	-2,8	0,6	-0,7	-2,1
Карское	7,4	-14,3	24,3	0,1	0,7	0,0	-0,2	0,7	0,8	0,1	-3,1	5,7
Лаптевых	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,1	-0,1	0,5	0,5	0,0	0,0
Восточно-Сибирское	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,7	-0,1	-1,0
Чукотское	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	-0,7	-0,1	-0,8	-1,6

Таблица 13 Тенденция изменчивости повторяемости опасного волнения

Сравнительный анализ позволил узнать о тенденции и региональные особенности изменений волнового режима за последние два десятилетия. Полученные результаты дают понять, что в большинстве месяцев идет тенденция на увеличение количества случаев опасного волнения. Это видно в таблице 11 на примере Баренцево и Карских морях, где можно увидеть тенденцию на увеличение количества случаев в весенний период. Для Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых это тенденция проявляется в осенний период. Эти изменения особенно важны для понимания последствий климатических изменений и прогнозирования условий судоходства в будущем.

6.3 Анализ полученных результатов.

Проведенный анализ данных о волновом режиме в акватории Северного морского пути выявил значительные пространственно-временные различия в повторяемости опасных волнений, представляющих серьезную угрозу для безопасности мореплавания. Результаты обработки многолетних наблюдений показывают, что частота возникновения экстремальных волновых условий, способных привести к повреждению судовых конструкций и создающих аварийные ситуации, варьируется от 5% в центральных арктических морях до 20% в наиболее подверженных штормовым воздействиям Баренцевом и Чукотском морях. Такая выраженная региональная дифференциация обусловлена комплексом факторов, включая продолжительность безледного периода, интенсивность ветровой активности, особенности рельефа дна и конфигурации береговой линии.[https://russian-arctic.info/info/articles/okeanology/sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy-issledovaniy-ledyanogo-pokrova-morey-rossiyskoy-arktiki/] Особую тревогу

вызывает выявленная тенденция к увеличению повторяемости опасного волнения в последнее десятилетие (2015-2024 гг.) по сравнению с предыдущим периодом (2005-2014 гг.), что проявляется в росте соответствующих показателей на 15-25% в различных районах СМП, в частности эти изменения видны Карском море и в море Лаптевых. Этот тренд хорошо коррелирует с наблюдаемыми климатическими изменениями, выражающимися в сокращении ледовитости и увеличении продолжительности навигационного сезона. Полученные результаты имеют важное практическое значение для современного арктического судоходства, поскольку позволяют не только оценить текущие риски повреждения судов, но и прогнозировать возможное ухудшение условий в ближайшей перспективе. Особенно актуальны эти данные для разработки дополнений к стандартам судостроения, оптимизации маршрутов следования, совершенствования систем гидрометеорологического мониторинга и прогнозирования, а также для актуализации нормативной базы, регулирующей вопросы безопасности мореплавания в условиях меняющейся Арктики. Дальнейшие исследования в этом направлении должны быть сосредоточены на более детальном анализе механизмов формирования опасных волновых условий с учетом взаимодействия таких факторов как ветровой режим, ледовая обстановка и рельеф дна, что позволит повысить точность прогнозов и разработать эффективные превентивные меры.

Заключение

.

Проведенный анализ многолетних данных выявил существенные изменения в опасных метеорологических явлениях, влияющих на безопасность арктического судоходства.

По ветровому режиму установлена устойчивая тенденция к увеличению продолжительности штормовых ветров, особенно выраженная в Баренцевом море, где за последнее десятилетие их длительность возросла на 1,5–2 часа. Это связано с трансформацией атмосферной циркуляции, сокращением ледового покрова и прогревом морской поверхности, что требует актуализации методов прогнозирования и корректировки нормативной базы.

В отношении обледенения выявлено значительное (в 2–3 раза) снижение частоты случаев брызгового обледенения, обусловленное повышением температур воздуха. Данная тенденция создает предпосылки для пересмотра существующих регламентов по борьбе с обледенением в сторону их оптимизации с учетом современных климатических реалий.

Анализ волновых условий показал, что экстремальное волнение, представляющее угрозу для судовых конструкций, проявляет выраженную пространственную и сезонную изменчивость. Наибольшая повторяемость опасных волн (до 20%) характерна для Баренцева и Чукотского морей, тогда как в центральных арктических морях этот показатель не превышает 5%.

Полученные результаты подчеркивают необходимость комплексного подхода к модернизации системы безопасности мореплавания в Арктике, включая:

- совершенствование прогностических моделей ветрового и волнового режимов;

- актуализацию нормативных документов с учетом выявленных климатических трендов;

- разработку адаптивных стратегий судовождения, минимизирующих риски в условиях меняющейся Арктики.

Реализация этих мер позволит существенно повысить уровень безопасности и эффективности эксплуатации Северного морского пути в новых климатических реалиях.

Литература

1.РД 52.27.724-2009. *Руководство по краткосрочным прогнозам погоды*. Москва: Росгидромет. https://method.meteorf.ru/norma/document/treb2009.pdf

2.РД 52.27.881-2019. Руководство по гидрометеорологическому обеспечению морской деятельности https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293724/4293724607.pdf

3.Официальный сайт Росгидромета: https://meteorf.gov.ru

4.Иванов Н.Е. и др. (2020) "Современные изменения ледового покрова морей Российской Арктики". *Океанология*, 60(4), с. 517-529

5.Груза Г.В., Ранькова Э.Я. (2022) "Экстремальные метеорологические явления в Арктической зоне РФ". *Лёд и Снег*, 62(2), с. 181-194.

6. ГНИНГИ Наставление по навигации и гидрографии №31 (СССР/РФ)

https://gningi.ru/images/journal/nig31.pdf]

7. ВЛИЯНИЕ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ. https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-opasnyh-prirodnyh-protsessov-i-yavleniy-na-bezopasnost-hozyaystvennoy-deyatelnosti-v-arkticheskoy-zone-rf

8. РД 52.04.563-2002 критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения

9. Атлас Арктики (1985 г., главный редактор — А.Ф. Трёшников)]

10. атлас WOA2023 (Левитус) [https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-atlas-2023/]

Приложение А

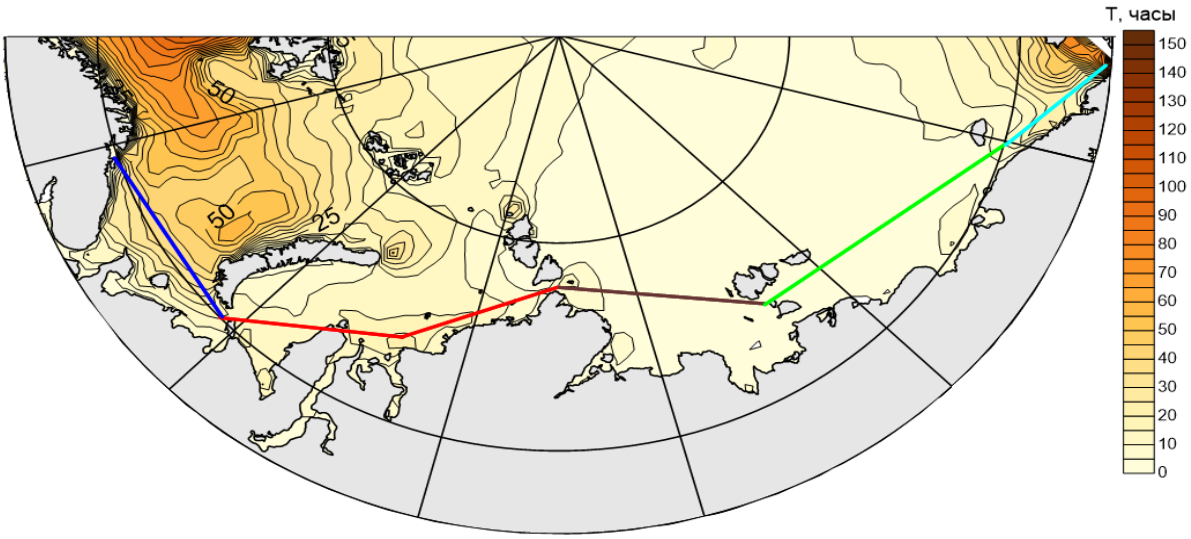

Рисунок А.1. Карта продолжительности штормового ветра (15 м/с и более) , часы. Январь

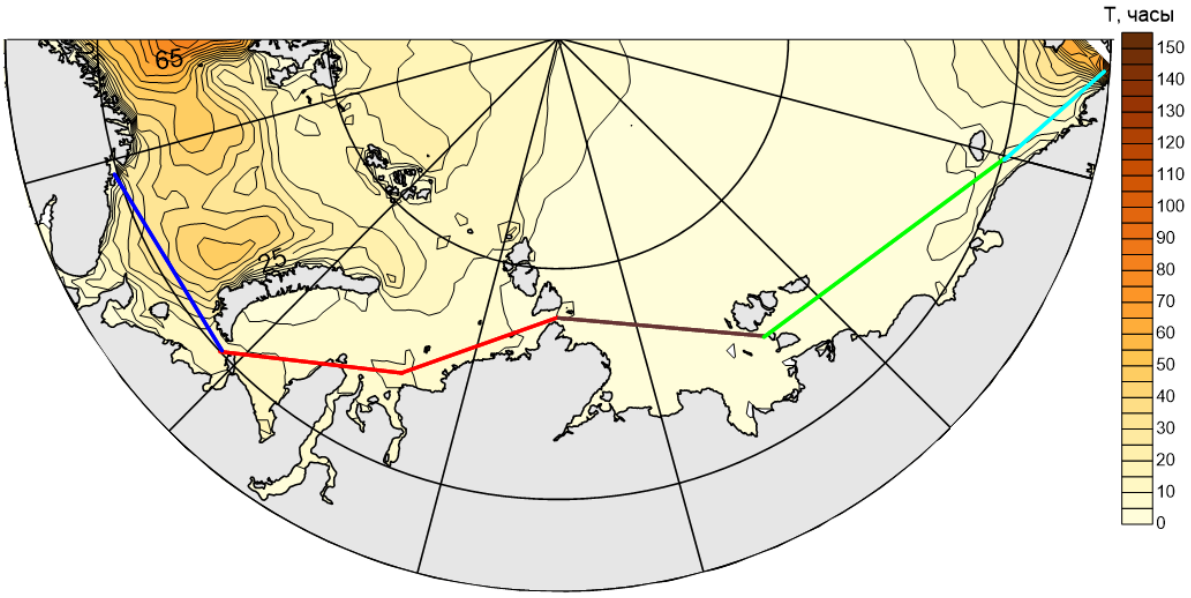

Рисунок А.2. Карта продолжительности штормового ветра (15 м/с и более) , часы. Февраль

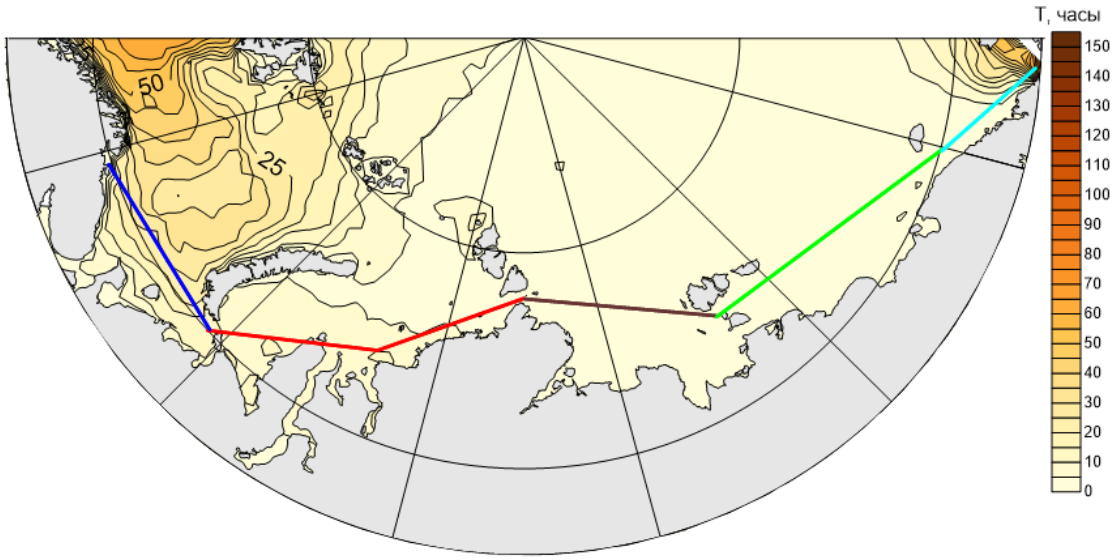

Рисунок А.3. Карта продолжительности штормового ветра (15 м/с и более) , часы. Март

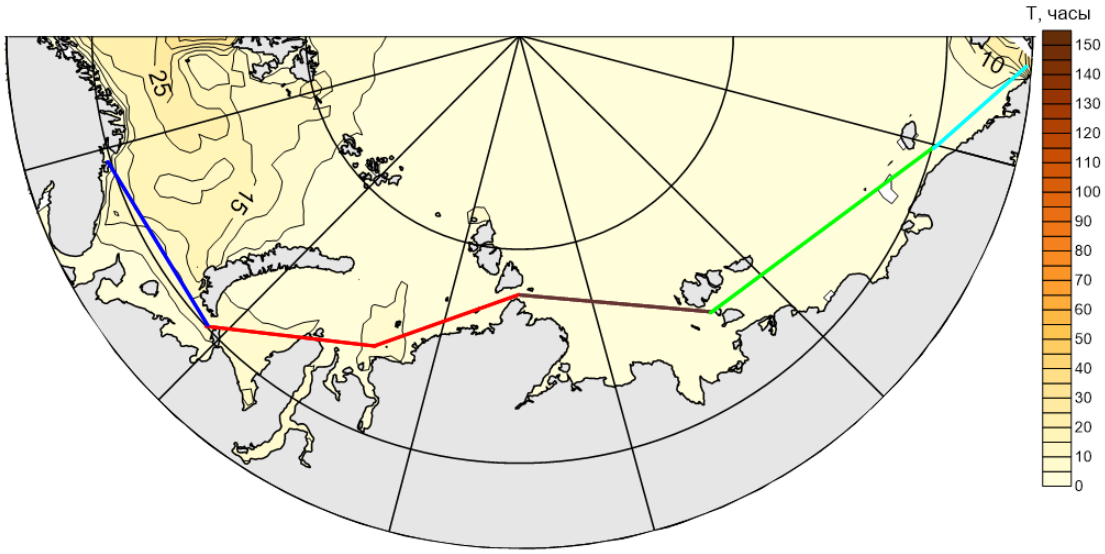

Рисунок А.4. Карта продолжительности штормового ветра (15 м/с и более) , часы. Апрель

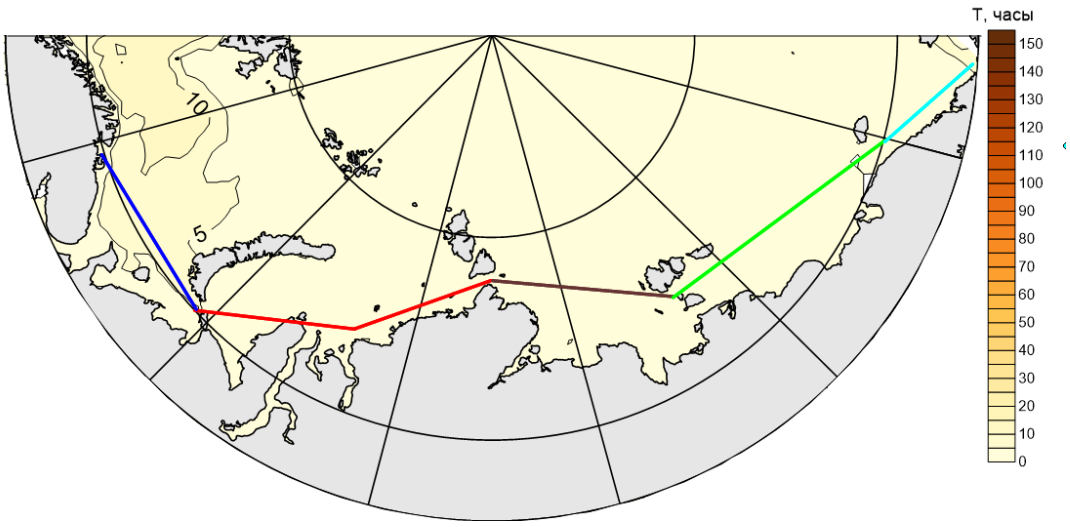

Рисунок А.5. Карта продолжительности штормового ветра (15 м/с и более) , часы. Май

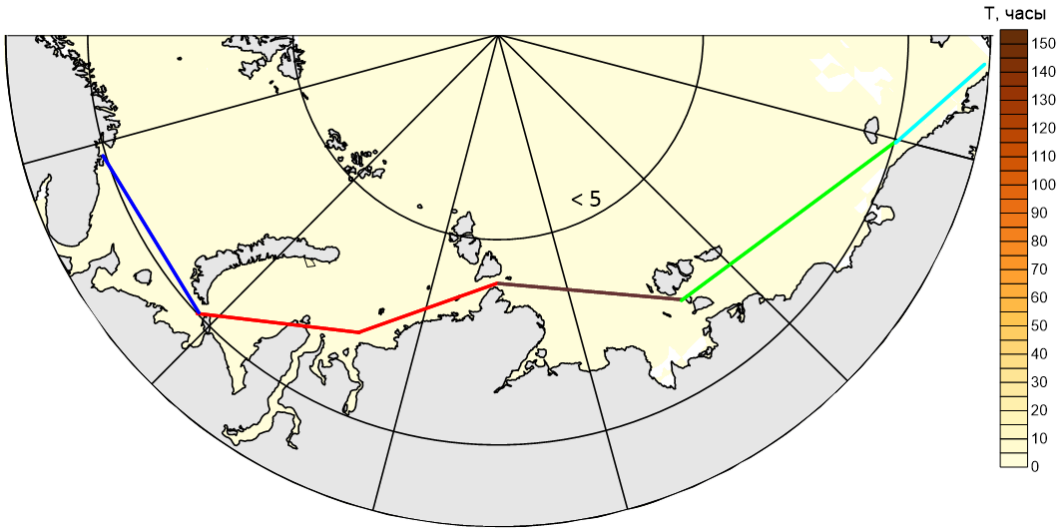

Рисунок А.6. Карта продолжительности штормового ветра (15 м/с и более) , часы. Июнь

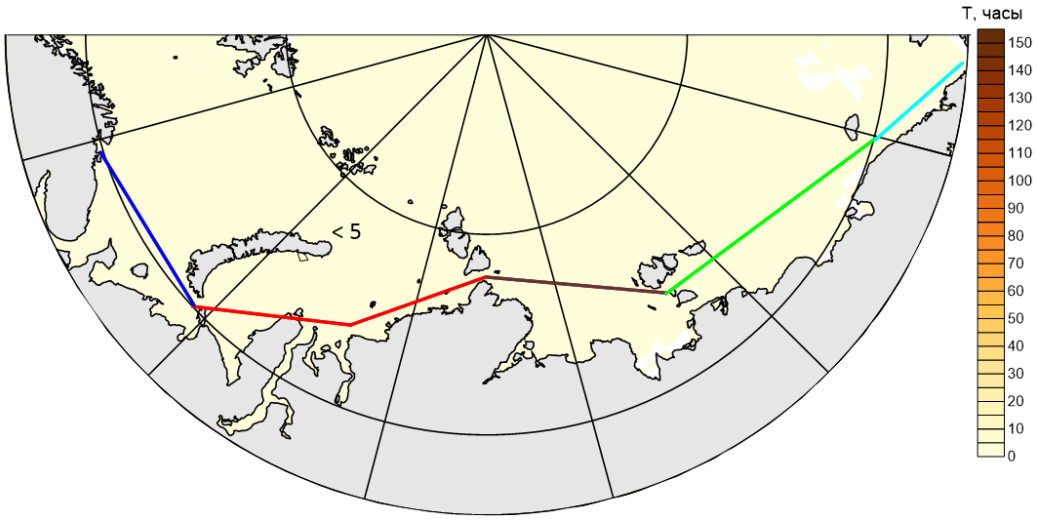

Рисунок А.7. Карта продолжительности штормового ветра (15 м/с и более) , часы. Июль

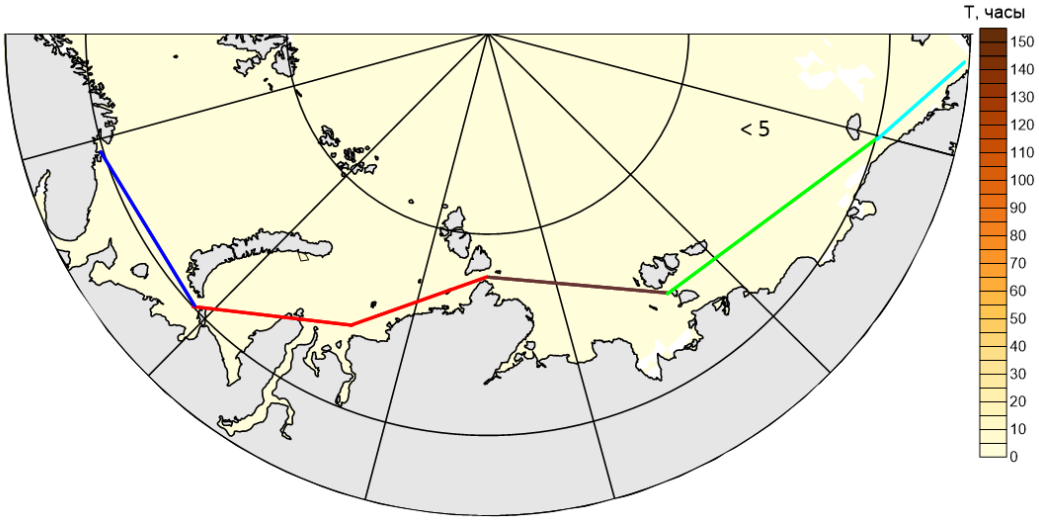

Рисунок А.8. Карта продолжительности штормового ветра (15 м/с и более) , часы. Август

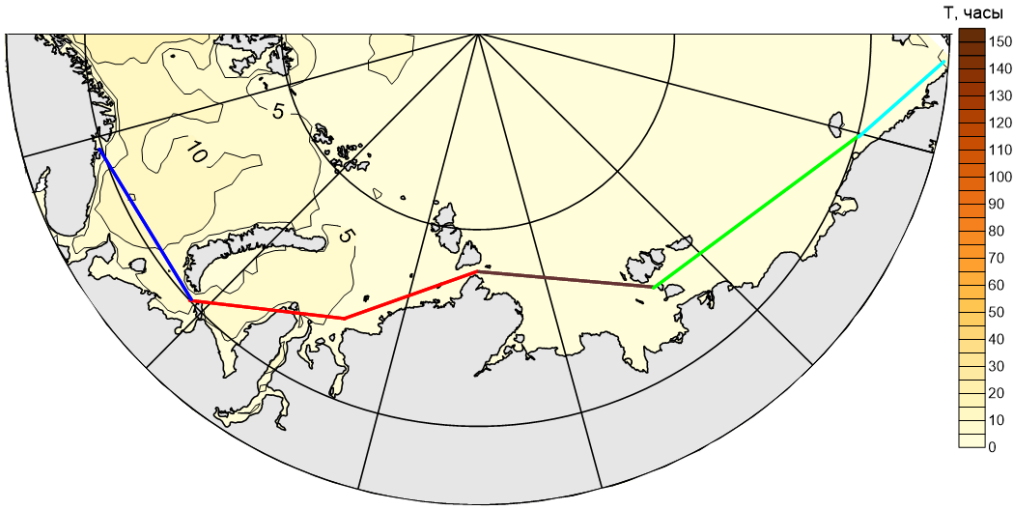

Рисунок А.9. Карта продолжительности штормового ветра (15 м/с и более) , часы. Сентябрь

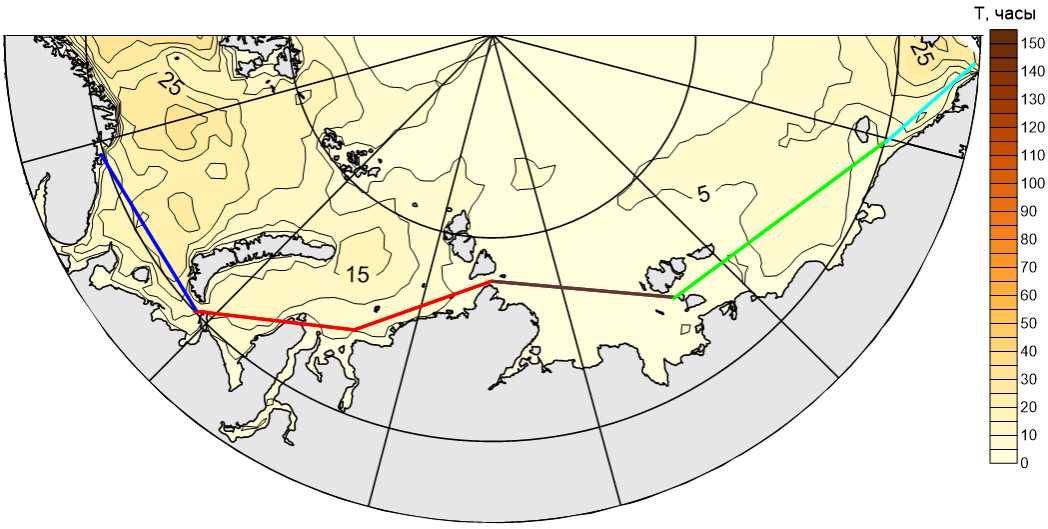

Рисунок А.10. Карта продолжительности штормового ветра (15 м/с и более) , часы. Октябрь

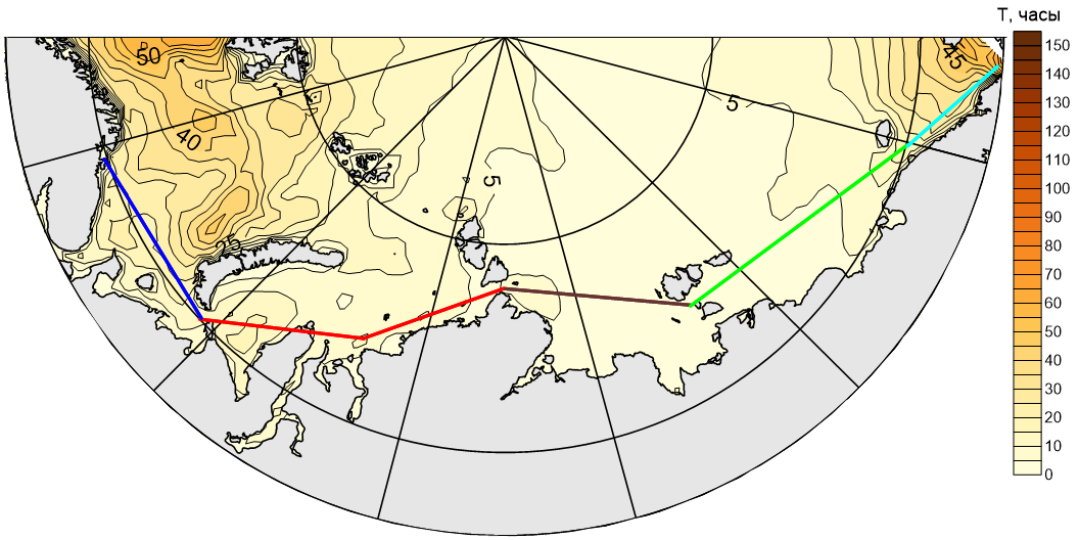

Рисунок А.11. Карта продолжительности штормового ветра (15 м/с и более) , часы. Ноябрь

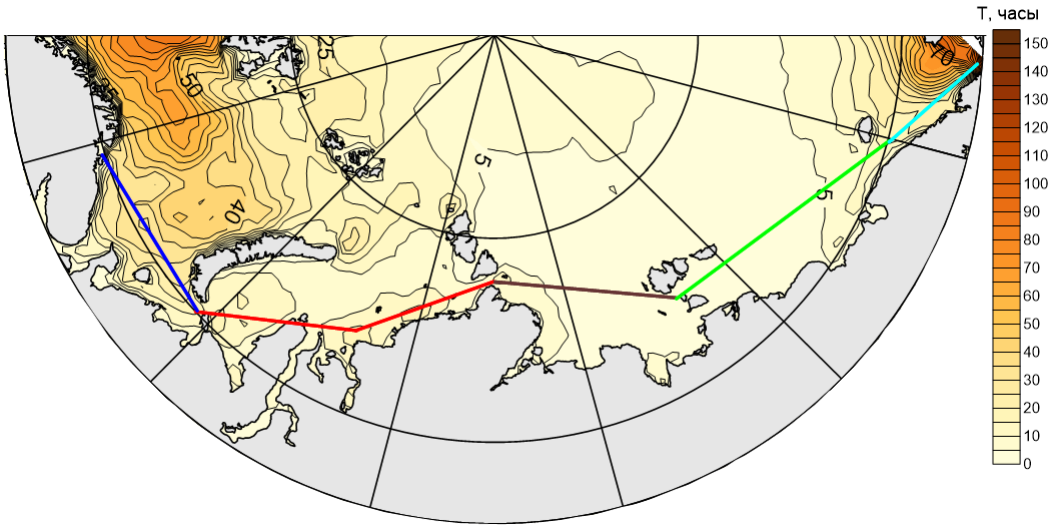

Рисунок А.12. Карта продолжительности штормового ветра (15 м/с и более) , часы. Декабрь