



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Бакалавровская работа)

На тему: «Обледенение морских судов в Балтийском море»

Исполнитель Сафонова Мария Денисовна
(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)

« 8 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ И ПОНЯТИЕ БРЫЗГОВОГО ОБЛЕДЕНЕНИЯ.....	5
1.1 Географические особенности Балтийского моря.....	5
1.2 Климатические особенности Балтийского моря.....	7
1.3 Ледовый режим акватории Балтийского моря.....	9
1.4 Влияние обледенения на морские суда.....	11
1.5 Виды обледенения.....	13
1.6 Статистика обледенений.....	14
1.7 Брызговое обледенение.....	16
1.8 Влияние типа судна на процесс обледенения в Балтийском море.....	18
1.9 Технические и организационные меры борьбы с обледенением судов.....	20
1.10 Подходы к прогнозированию брызгового обледенения.....	21
1.11 Метод расчета брызгового обледенения Оверленда.....	22
Глава 2. ПОВТОРЯЕМОСТЬ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ БРЫЗГОВОГО ОБЛЕДЕНЕНИЯ.....	24
2.1 Исходные данные.....	24
2.2 Тенденция сокращения ледового покрова.....	26
2.3 Повторяемость брызгового обледенения различной интенсивности по месяцам.....	29
2.4 Условия образования брызгового обледенения в Балтийском море.....	31
2.5 Синоптический анализ случаев при тяжелом обледенении морских судов	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	43
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	45

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность:

Исследование брызгового обледенения имеет большое значение для безопасности и эффективности работы морских судов, оно может увеличивать вес судна, снижает остойчивость и может приводить к опрокидыванию, а образование льда на оборудовании нарушает работу систем. Изучение важно для разработки эффективных методов борьбы, чтобы совершенствовать прогнозирование и предотвращать опасные ситуации. Балтийское море имеет важное научное и практическое значение, так как это чувствительный к глобальному потеплению регион, а анализ динамики данного обледенения помогает оценить влияние изменения климата на морские экосистемы

Цель работы:

Исследовать благоприятные условия образования брызгового обледенения на морских судах в районе Балтийского моря

Задачи:

1. Собрать массив данных реанализа по температуре воздуха, температуре воды, ветру и солёности по району Балтийского моря;
2. Рассчитать индекс брызгового обледенения по рассматриваемой акватории;
3. Проанализировать ежемесячную повторяемость за весь период с учётом положения кромки льда;
4. Проанализировать благоприятные условия по температуре воды, воздуха и ветра.
5. Рассмотреть синоптическую ситуацию для случаев с наибольшей площадью опасной зоны брызгового обледенения.

Объект и предмет исследования:

Объектом исследования в данной работе является такое явление как брызговое обледенение на морских судах в районе Балтийского моря. Предметом же исследования выступают метеорологические и синоптические

процессы при обледенении. Например, метеорологические факторы и гидрологические особенности.

Методы исследования, используемые в работе стали расчёт и анализ показателя обледенения, чтобы выявить потенциально опасные районы брызгового обледенения в разные сезоны и при определённых метеорологических условиях по всей акватории Балтийского моря.

ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ И ПОНЯТИЕ БРЫЗГОВОГО ОБЛЕДЕНЕНИЯ

1.1 Географические особенности Балтийского моря

Балтийское море представляет собой внутриматериковый шельфовый водоём, относящийся к бассейну Атлантического океана. Его побережье разделяют между собой девять государств: Дания, Германия, Польша, страны Балтики (Латвия, Литва, Эстония), Россия, Финляндия и Швеция. Западная граница моря определяется условной линией, соединяющей северную оконечность Ютландского полуострова (мыс Скаген) с островом Черн, расположенным севернее Гётеборга.



Рис1.1. Карта акватории Балтийского моря[15]

Связь с Атлантическим океаном осуществляется через систему проливов включающих Скагеррак, Каттегат и Датские проливы (Большой и Малый Бельт, Эресунн, Фемарн-Бельт). Однако из-за малых глубин на порогах (7-18 метров) водообмен между Балтийским и Северным морями существенно ограничен. Эта

особенность играет ключевую роль в формировании уникальных гидрологических и климатических условий региона.

В меридиональном направлении акватория простирается от Щединского залива ($53^{\circ}40'$ с.ш.) до района полярного круга ($65^{\circ}50'$ с.ш.), что составляет около 1350 км. Широтная протяжённость между Фленсбургом ($9^{\circ}25'$ в.д.) и Санкт-Петербургом ($30^{\circ}15'$ в.д.) также приближается к 1350 км (по 54-й параллели). Максимальная диагональная дистанция (от Торнио до Скагена) достигает 1800 км.

Такая значительная протяжённость в сочетании с разнообразием физико-географических условий приводит к выраженным региональным различиям:

- Климатические показатели существенно варьируют между южными и северными районами.
- Гидрологический режим отличается в восточной и западной частях акватории.
- Ледовые условия проявляются неравномерно на всей акватории.

Эти особенности необходимо учитывать при анализе процессов обледенения судов, так как интенсивность и частота данного явления напрямую зависят от локальных географических климатических факторов. [1]

1.2 Климатические особенности Балтийского моря

Климатические особенности региона определяются его положением в умеренном поясе, для которого характерна относительная стабильность температурного режима с незначительными суточными и сезонными колебаниями. Отличительными чертами являются повышенная влажность воздуха, преобладание пасмурной погоды и равномерное распределение осадков в течение года.

Зимний период отличается мягкостью с преобладанием облачной погоды, частыми осадками и туманами. Экстремально низкие температуры наблюдаются редко, а при прохождении циклонов возможны оттепели. Преобладают восточные и западные ветра, которые наблюдаются в районе проливов когда над Северной и Восточной Европой наблюдается развитая антициклоническая деятельность. Весенний сезон характеризуется продолжительным переходным периодом. Первая половина весны сопровождается заморозком и мокрым снегом, тогда как во второй половине сезона уменьшается частота осадков и туманов. Направление ветров становится менее устойчивым.

Летний период преимущественно прохладный с высокой облачностью. Жаркая погода носит кратковременный характер. Во второй половине лета отмечается увеличение количества ливневых осадков.

Осенний сезон относительно тёплый с преобладанием пасмурной погоды, обложных осадков и учащением случаев туманов. Характерно усиление ветра.

В акваториях заливов и фьордов климатические условия отличаются большей континентальностью: увеличиваются температурные колебания, снижается влажность и уменьшается количество осадков по сравнению с открытыми участками моря.

Метеорологические условия региона можно классифицировать по следующим типам:

1. северо-восточный перенос характеризуется слабыми ветрами (до 7 м/с), пониженной облачностью и незначительными осадками. Температурный режим: зимой от -8°C до -16°C , летом около 12°C .

2. Юго-восточный перенос воздушных масс создаёт условия с ветрами до 15 м/с, малой облачностью и редкими осадками. Температурный диапазон: зимой $0\text{...}-8^{\circ}\text{C}$, летом до 30°C .

3. Юго-западный тип погоды формируется под влиянием атлантических воздушных масс с порывистыми ветрами (до 20 м/с), высокой облачностью и частыми туманами. Характерны зимние снегопады и летние ливни с грозами. Температурный диапазон: зимой $-4\text{...}+4^{\circ}\text{C}$, летом $16\text{-}20^{\circ}\text{C}$.

4. Северо-западный перенос воздушных масс сопровождается ветрами 10-15 м/с, с кучевой облачностью и кратковременными осадками. Отмечается высокая погодная изменчивость. Температурный диапазон: $-3\text{...}-14^{\circ}\text{C}$, летом $10\text{-}15^{\circ}\text{C}$.

5. Антициклональные условия характеризуются слабыми переменными ветрами и пониженной облачностью. Зимой устанавливается сухая морозная погода, летом - тёплая с кратковременными дождями.

6. Циклонический тип погоды отличается неустойчивыми ветрами до 15 м/с, сплошной облачностью и интенсивными осадками. В холодный сезон характерны продолжительные туманы. Температурный диапазон: зимой $-5\text{...}+5^{\circ}\text{C}$, летом $10\text{-}12^{\circ}\text{C}$.

Особые погодные условия формируются в районе Датских проливов:

– Западный тип с юго-западными ветрами, значительной облачностью и обильными осадками.

– Восточный тип с северо-восточными ветрами, пониженной облачностью и слабыми осадками наиболее характерный для поздней зимы и весны.[2]

1.3 Ледовый режим акватории Балтийского моря

Ледовые условия Балтийского моря отличаются выраженной сезонной и региональной изменчивостью, обусловленной особенностями его географического положения и гидрометеорологического режима. Ежегодное образование ледяного покрова начинается в восточных и северных районах, постепенно распространяясь в западном направлении. Первые ледовые образования появляются в ноябре в защищённых бухтах Ботнического залива и Финского залива, тогда как открытые акватории замерзают значительно позже - в декабре-январе, а в южные районы покрываются льдом только особо суровые зимы.

Пик ледовости наблюдается в конце зимы, когда максимальная толщина льда в различных частях моря достигает от 10-30 см в обычные зимы до 80-100 см в экстремально холодные периоды. Особенно мощный слой льда на судах формируется в северных акваториях, где в результате интенсивного торообразования высота ледяных гряд может превышать 15-20 метров. Процесс разрушения ледяного покрова весной происходит в обратном направлении - с запада на восток, причём сроки полного очищения акватории варьируют от конца марта в южных районах до июня - июля в северной части Ботнического залива.

Характерной особенностью Балтийского моря является значительной разницей в продолжительности ледового периода между отдельными районами. В то время как южные акватории могут оставаться подо льдом всего 3-4 недели, в северных районах, особенно в вершине Ботнического залива, ледовый период продолжается 7-8 месяцев. Вдоль восточного побережья продолжительность ледового сезона составляет от 1,5 до 3 месяцев, а в Финском и Рижском заливах - от 3 до 5,5 месяцев.

Динамика ледовых масс определяется преимущественно ветровым режимом. Дрейфующие льды, состоящие из битого льда и ледяных полей, обычно имеют сплочённость 8-10 баллов, которая к весне снижается на 1-2 балла. В защищённых бухтах и заливах формируется устойчивый припай, который

особенно развит в северных районах и подвержен интенсивному торообразованию при сжатии. Наиболее сложные ледовые условия наблюдаются в районах с переменными течениями и у островных архипелагов, где часто образуются зоны повышенной концентрации льда. [3]

1.4 Влияние обледенения на морские суда

Обледенение судов представляет особо серьёзную угрозу безопасности мореплавания, оказывая многогранное негативное воздействие на суда и их экипажи. Это природное явление характерное для холодных морей, способно в короткие сроки создать критические ситуации, требующие незамедлительного реагирования. Рассмотрим основные аспекты этого воздействия более подробно.

Одним из наиболее опасных последствий обледенения является ухудшение остойчивости судна, когда лёд нарастает на надстройках, мачтах и такелаже, происходит значительное смещение центра тяжести вверх. Это явление особенно опасно для небольших и средних судов, таких как рыболовные траулеры или научно-исследовательские суда. Постепенное накопление льда может добавить десятки тонн дополнительного веса, что существенно снижает запас плавучести. В истории мореплавания зафиксированы случаи, когда переобледеневшие суда внезапно теряли остойчивость и переворачивались буквально за считанные минуты. Особую опасность представляет неравномерное обледенение создающее крен, который может достигать критических значений.

Не менее серьёзную проблему представляет повреждение судового оборудования. Ледяная корка, образуемая на палубных механизмах, может вывести из строя лебёдки, краны и другое важное оборудование. Особенно уязвимы элементы такелажа, судовые антенны и системы навигации. Известны случаи, когда обледенение радиолокационных антенн приводило к потере радиолокационного контакта в самый критический момент. На рыболовных судах лёд часто блокирует работу промыслового оборудования. Делая невозможным выборку сетей или тралов. В тяжёлых случаях лёд может повредить даже элементы корпуса, особенно когда его нарастание сопровождается сильной качкой.

Особого внимания заслуживают риски для экипажа. Обледенение палуб и переходных мостиков создаёт прямую угрозу жизни и здоровью моряков.

Скользкие поверхности значительно увеличивают вероятность падений и травм, особенно в штормовых условиях. Замёрзшие двери и люки могут заблокировать аварийные выходы, а обледеневшие спасательные средства становятся непригодными к использованию. Кроме того постоянная необходимость бороться с обледенением - рубить лёд и поливать его специальными составами - подвергает экипаж дополнительным физическим нагрузкам и переохлаждению. В экстремальных ситуациях, когда судно теряет остойчивость из-за льда, у экипажа может остаться совсем мало времени для спасения.

Практический опыт показывает, что последствия обледенения носят комплексный характер. Например, потеря остойчивости часто усугубляется тем, что обледеневшее оборудование перестаёт функционировать именно в тот момент, когда оно больше всего нужно для борьбы с аварийной ситуацией. А физическое истощение экипажа, вызванное непрерывной борьбой с обледенением, снижает его способность адекватно реагировать на возникающие угрозы. Все эти факторы взаимосвязаны и могут привести к катастрофическим последствиям, особенно в условиях открытого моря, когда помощь извне может прийти не сразу.

Так, например маломерное судно «Ашамба» потерпело крушение в акватории яхт-клуба «7 футов» порта Новороссийска 22 февраля 2025 года из-за обледенения и потери устойчивости.[5].

В современных условиях, несмотря на совершенствование судовых конструкций, и систем предупреждения, проблема обледенения остаётся актуальной. Особую обеспокоенность вызывает изменение климата, которое приводит к более частым перепадам температур и увеличению количества опасных метеорологических ситуаций. В таких условиях понимание природы обледенения и его последствий становится важным элементом обеспечения безопасности мореплавания в холодных морях [4].

1.5 Виды обледенения

Обледенение судов представляет собой сложный физический процесс, при котором различные элементы судовых конструкций постепенно покрываются слоем льда. Это явление возникает в результате замерзания водяных частиц при специфических погодных условиях, характерных для холодного времени года. Основными условиями для начала процесса обледенения является сочетание низких температур воздуха с высокой влажностью и значительной ветровой активностью.

Механизм образования ледяного покрова на судах может существенно различаться в зависимости от источника поступления воды. Наиболее распространенным является случай, когда ледяная корка образуется из морской воды, попадающей на борт в виде брызг при сильном волнении. В таких условиях волны, разбиваясь о корпус судна, создают множества мелких капель, которые почти мгновенно замерзают на охлаждённых поверхностях. Особенно интенсивно этот процесс протекает в носовой части судна и на палубных надстройках. Нередко к брызговому обледенению добавляется эффект от заливания палубы волнами, что значительно ускоряет нарастание ледяного покрова.

На практике часто встречается комбинированный вариант, когда на судне одновременно действует несколько факторов обледенения. В таких случаях слой льда формируется как из морской воды, поступающей в виде брызг и заливания, так и из атмосферных осадков. Подобные условия создают наиболее опасную ситуацию, так как скорость нарастания льда значительно увеличивается, а образующаяся ледяная корка может иметь сложную слоистую структуру с различными физическими свойствами. Особенно характерны такие условия для переходных сезонов, когда температурные показатели колеблются около нулевой отметки. [6].

1.6 Статистика обледенений

Обледенение судов в северном полушарии представляет серьёзную угрозу для мореплавания в течение значительной части года. В разных регионах продолжительность опасного периода варьируется: в северной Атлантике суда сталкиваются с этой проблемой около четырёх месяцев, тогда как в дальневосточных морях - до пяти месяцев. Наиболее продолжительный и интенсивный период обледенения наблюдается в северной части Атлантического океана, а также в Беринговом и Охотском морях, где пик опасности приходится на январь-февраль.

Интересно, что в арктических морях обледенение может происходить даже летом и осенью, если отрицательные температуры воздуха сочетаются с сильным волнением. Особенно часто это случается в конце навигационного сезона - во второй половине сентября и октября, когда суда ещё работают в открытой воде, но погодные условия уже становятся опасными.

Анализ более 3000 случаев обледенения рыболовных судов в различных морях северного полушария показывает чёткую закономерность. Подавляющее большинство инцидентов (около 90%) связано с морскими брызгами, которые замерзают на поверхностях судов. Остальные случаи распределяются следующим образом: 6% - комбинация брызг с дождём туманом или моросью; 3% - обледенение исключительно от атмосферных осадков; и лишь 1% - результат совместного действия брызг и снега. В арктических условиях основную опасность также представляет брызги, особенно когда они сочетаются с осадками.

Исследование гидрометеорологических условий, приводящих к обледенению, выявило ключевые факторы риска. На первом месте стоят температура воздуха и воды, чем больше разница между ними, тем интенсивнее идёт процесс. Не менее важны скорость и направление ветра, которые определяют количество брызг, попадающих на судно. Волнение моря усиливает этот эффект, а наличие ледяного покрова изменяет условия

теплообмена. Все эти параметры необходимо учитывать при прогнозировании обледенения, особенно в наиболее опасные зимние месяцы.

Особого внимания заслуживает брызговое обледенение - не только как наиболее распространённое, но и как самое опасное. Оно развивается быстро и часто приводит к критическому нарастанию льда на важных конструкциях судна. Именно поэтому при составлении прогнозов и разработке мер защиты основное внимание уделяется именно этому типу обледенения. [6]

1.7 Брызговое обледенение

Формирование ледяного нароста на судах в результате воздействия морских брызг представляет собой сложный физический процесс, развивающийся при определённых гидрометеорологических условиях. При движении судна в штормовую погоду волновые удары о корпус создают облако водяных брызг, которые ветром переносятся на надводные конструкции. Попадая на охлаждённые поверхности, эти капли мгновенно кристаллизуются, образуя слой льда.

Особую интенсивность процесс приобретает при сильном волнении, когда помимо забрызгивания происходит регулярное заливание палубы забортной водой. Часть воды успевает стечь через дренажные системы, но значительный объем остаётся на палубе, быстро превращаясь в слой льда. Дополнительным фактором становится перенос ветром водяных брызг с гребней волн, которые также оседают на судовых конструкциях. В условиях плавания у кромки льда опасность представляет попадание на палубу ледяной каши и снежной шуги, способствующих ускоренному обледенению.

Локализация ледяных отложений имеет чётко выраженную пространственную структуру. Наибольшая интенсивность обледенения наблюдается на наветренных поверхностях - бортах, палубных механизмах, элементах такелажа и надстроек. Вертикальное распространение ледяного покрова напрямую зависит от силы ветра и высоты волнения - чем мощнее шторм, тем выше поднимаются брызги и, соответственно, тем выше распространяется зона обледенения. При этом толщина ледяного слоя закономерно уменьшается с высотой.

Опасность данного явления обусловлена комплексом факторов. Помимо очевидного увеличения весовой нагрузки, ледяные отложения значительно ухудшают остойчивость судна за счёт смещения центра тяжести вверх. Особенно критичным становится обледенение высоко расположенных конструкций, которое может привести к катастрофической потере остойчивости и опрокидыванию судна. В арктических условиях риск

усугубляется возможностью комбинированного воздействия морских брызг и атмосферных осадков.

Особая значимость брызгового обледенения в общей структуре ледовых опасностей для судоходства определяется его высокой повторяемостью и потенциальной разрушительностью. Именно этот тип обледенения становится ключевым объектом при разработке методов диагностики и прогнозирования ледовой опасности для морских судов. [6]

1.8 Влияние типа судна на процесс обледенения в Балтийском море

Влияние типа судна на процесс обледенения в Балтийском море - это важный аспект. Каждый тип судов имеет свои особенности, которые по-разному сказываются на интенсивности образования льда.

Рыболовные суда чаще всего страдают от обледенения из-за своей конструкции. У них обычно низкий надводный борт и открытые рабочие палубы, где во время шторма скапливается вода. Когда судно работает в условиях мороза и сильного ветра, брызги быстро замерзают на снастях, лебёдках и бортах. Особенно опасны траулеры - их промысловое оборудование (сети и стрелы) создаёт дополнительные поверхности для нарастания льда. В истории Балтики известно несколько случаев, когда перегруженные льдом рыболовные суда теряли остойчивость.

Грузовые суда (балкеры, контейнеровозы, танкеры) обледенеют иначе. У них выше надводный борт, но проблема в палубных конструкциях - грузовые люки, краны, вентиляционные шахты. Например, на балкерах открытые трюмы во время шторма заливаются водой, которая замерзает, увеличивает вес судна. Танкеры менее подвержены обледенению из-за гладких палуб, но их надстройки (особенно ходовой мостик) часто покрываются льдом, что мешает обзору.

Пассажирские суда и паромы - совершенно другая ситуация. Их высокие борта и обтекаемые формы уменьшают попадание брызг, но огромные палубные надстройки (где расположены каюты, рестораны) становятся ловушкой для льда. Например, паромы на линии Хельсинки - Таллин зимой регулярно сталкиваются с обледенением стёкол и леерных ограждений. Главная опасность - смещение центра тяжести вверх из-за льда на верхних палубах.

Конструктивные особенности играют ключевую роль:

1. Высота борта - чем она меньше, тем больше волнозабрызгивание (у рыболовных судов это критично).

2. Палубные надстройки - их сложная конструкция (мачты, леера, оборудование) увеличивает площадь обледенения.

3. Материал корпуса - сталь обмерзает быстрее, чем современные композитные покрытия. [7]

1.9 Технические и организационные меры борьбы с обледенением судов
Техническими средствами защиты выступают:

1. Системы обогрева - наиболее распространены два типа:

- Паровые системы - используют тепло от главного двигателя для обогрева палубных конструкций и такелажа. Применяются на крупных судах, таких как танкеры и контейнеровозы. Эффективность исследования подтверждается ИМО (2016) [18]

-Электрические нагреватели - устанавливаются на элементы надстроек, леерные ограждения. Они потребляют много энергии, поэтому зачастую используются на рыболовных судах в которых есть мощные генераторы. Такие системы снижают обледенение на почти 40-60%, что подтверждают данные DNV GL. [19]

2. Антиобледенительные покрытия - специальные составы на основе:

-Полиуретанов - создают гидрофобный слой, который отталкивает воду.

-Эпоксидных смол с добавками - уменьшают адгезию льда.

Испытания ААНИИ показывали, что такие покрытия могут замедлить нарастание льда в 1,5-2 раза, но требуют регулярного обновления - особенно это свойственно Балтики, где механические повреждения от льда случаются намного чаще.

Так, например, хорошее оборудование и подготовка экипажа спасла жизни людей во время ЧС на борту судна «Капитан Воронин». В 2021 году траулер успешно предотвратит аварийную ситуацию благодаря работе паровой системы обогрева палубы, своевременной очистке такелажа по графику, а также антиобледенительного покрытия на надстройках. [16]

1.10 Подходы к прогнозированию брызгового обледенения

В современных методиках Росгидромета и международной практике судовождения принята чёткая классификация обледенения судов в зависимости от метеоусловий. При работе с рыбопромысловыми судами мы ориентируемся на три основные градации интенсивности этого опасного явления.

При медленном обледенении, которое возникает либо при слабом ветре любой силы и температурах от -1°C до -3°C , либо при умеренном ветре 0-9 м/с и более низких температурах, лёд нарастает со скоростью менее 0,7 см/ч. Это хоть и создаёт определённые сложности, но не представляет непосредственной угрозы для судна.

Более опасным является быстрое обледенение, развивающееся при ветре 9-15 м/с и температурах от -3°C до -8°C . В таких условиях скорость нарастания льда достигает 0,7-1,3 см/ч, что уже классифицируется как опасное явление (ОЯ) и требует принятия срочных мер.[12]

Наиболее критичная ситуация возникает при очень быстром обледенении, когда при ветре свыше 15 м/с и температуре ниже -8°C лёд может нарастать со скоростью более 1,4 см/ч. В таких условиях даже за несколько часов судно может получить опасную ледовую нагрузку.

Интересно, что аналогичные критерии были независимо разработаны зарубежными исследователями. В частности, канадские и американские специалисты пришли к сходным выводам при изучении обледенения судов типа СРТ. Их наработки сейчас доступны на официальном сайте NOAA.

Особого внимания заслуживает метод Д. Оверленда, широко применяемый как за рубежом, так и у нас, для прогнозирования брызгового обледенения. Разработанная в 1980-х годах модель изначально создавалась для малотоннажных рыболовных судов, но благодаря последующим исследованиям была усовершенствована. Сегодня она учитывает комплексное взаимодействие метеорологических параметров. Этот подход позволяет более точно прогнозировать интенсивность обледенения в различных гидрометеорологических условиях.[8]

1.11 Метод расчета брызгового обледенения Оверленда

Основными гидрометеорологическими параметрами для возникновения брызгового обледенения выступают:

1. Скорость ветра
2. Температура воздуха
3. Температура воды
4. Температура замерзания воды
5. Направление ветра относительно судна
6. Характеристики ветрового волнения и зыби.

Методы к прогнозированию обледенения судов в России и за рубежом имеют существенные различия. В отечественной практике применяются ведомственные критерии оценки интенсивности обледенения, разработанные для различных типов судов и условий эксплуатации. Военно-морской флот использует нормативы, опубликованные в навигационных руководствах, тогда как для рыбопромысловых судов действуют специальные положения, закреплённые в отраслевых инструкциях по безопасности мореплавания. Росгидромет опирается на собственные рекомендации, содержащие детализированные параметры для гидрометеорологических прогнозов.

Особое место в расчетах занимает метод Д. Оверленда, получивший международное признание. Его принципиальное отличие от российских методик заключается в комплексном учёте четырёх ключевых параметров: скорости ветра, температуры воздуха и воды, а также точки замерзания морской воды, которая рассчитывается с учётом солёности. Данный подход был разработан на основе статистического анализа случаев обледенения судов среднего тоннажа, что определяет границы его оптимального применения.

Для расчета показателя брызгового обледенения используют формулу:

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

Где:

PPR - показатель обледенения;

V - скорость ветра;

Tf - скорость замерзания воды;

Ta - температура воздуха;

Tw - температура воды.

Расчёт температуры замерзания воды:

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

Где S - солёность воды.

Сам показатель обледенения является безразмерным.

Алгоритм расчётов по методу Д. Оверленда включает два последовательных этапа. Сначала вычисляется показатель PPR. Затем по табличным значениям определяется предполагаемая интенсивность.

Таб. 2.1 Интенсивность в зависимости от показателя обледенения

PPR	<0	0-22,4	22,4-53,3	53,3-83,3	>83,0
Обледенение	нет	легкое	умеренное	тяжелое	экстремальное

Наглядное представление критериев обледенения также может быть реализовано в виде номограмм, построенных для фиксированных значений температуры воды, что позволяет оперативно оценивать риск обледенения в различных гидрометеорологических условиях. Такой подход обеспечивает более детализированную оценку по сравнению с традиционными методами, учитывающими только температуру воздуха и скорость ветра. [9]

В настоящей работе в дальнейшем градации тяжёлое и экстремальное, будут объединены в одну и называться тяжёлое обледенение.

Глава 2. ПОВТОРЯЕМОСТЬ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ БРЫЗГОВОГО ОБЛЕДЕНЕНИЯ

2.1 Исходные данные

В работе использован массив реанализа ERA5.

ERA5 представляет собой пятую версию глобального климатического реанализа, разработанного Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды. Этот масштабный проект охватывает метеорологические данные за период с 1940 года до наших дней, заменив предыдущую версию ERA-Interim. В основе системы лежит комплексная методика ассимиляции данных, которая интегрирует показания наблюдательных сетей по всему миру с результатами численного моделирования атмосферных процессов.

Технологический процесс обработки информации в ERA5 аналогичен методам, используемым в оперативном прогнозировании, но реализован с меньшим пространственным разрешением для обеспечения возможности обработки многолетних массивов данных. Преимуществом реанализа является отсутствие временных ограничений, характерных для оперативных прогнозов, что позволяет проводить более тщательную проверку и корректировку исходных данных. Система формирует почасовые оценки множества параметров состояния атмосферы, океана и земной поверхности.

Актуальные данные системы обновляются ежедневно с пятидневным лагом. Предварительная версия (ERA5) в случае обнаружения существенных ошибок может отличаться от финального релиза, публикуемого с задержкой с 2-3 месяца. О таких расхождениях пользователи получают специальные уведомления.

Текущий доступный массив охватывает почасовые данные по отдельным уровням за весь период наблюдений с 1940 года. Данные размещены на высокопроизводительных носителях с ротационным доступом, что обеспечивает оперативное получение информации для большинства прикладных задач.

С архива ERA5 были скачаны данные по температуре воздуха и воды, а также компоненты скорости ветра [10]. Данные для работы были взяты с 2010 по 2025 гг. с шагом сетки 0,25°. Для расчета обледенения также использованы среднемесячные данные по солености воды из атласа WOA 2023 (Левитус).

Атлас WOA 2023 представляет собой наиболее полной на сегодняшний день базу данных о состоянии Мирового океана, объединяющую многолетние наблюдения с современными методами анализа. Этот глобальный ресурс содержит детальную информацию об основных физико-химических характеристиках океанских вод, собранную за весь период инструментальных измерений.

В основе атласа лежат систематизированные данные о температуре воды и солёности - ключевых параметрах, определяющих циркуляцию водных масс. Информация представлена в виде климатологических полей с месячным, сезонным и годовым разрешением, что позволяет изучать как сезонную динамику, так и долгосрочные изменения океанской среды. Особое внимание, как сезонную динамику, так и долгосрочные изменения океанской среды. Особое внимание уделено вертикальной структуре - данные охватывают всю толщу вод от поверхности до дна.

Данные WOA 2023 сочетает традиционные судовые измерения с новейшими данными автономных буев Argo и спутникового мониторинга. Это позволит повысить пространственное разрешение, особенно в прибрежных зонах и районах с интенсивной динамикой. Для каждого параметра рассчитываются показатели неопределённости, что важно для оценки достоверности результатов.

Атлас находит широкое применение в океанологических исследованиях, климатическом моделировании, изучении морских экосистем и решении прикладных задач. Его структурированный формат и единые стандарты обработки делают WOA 2023 универсальным инструментом для анализа состояния и изменчивости Мирового океана.[11]

2.2 Тенденция сокращения ледового покрова

Для того чтобы, построить карты повторяемости брызгового обледенения интенсивности по месяцам проанализированы сезонные изменения положения кромки льда на рассматриваемой акватории, чтобы определить районы возможного обледенения.

Для начала построены графики годового хода площади льда по данным ААНИИ (рисунок 2.1)

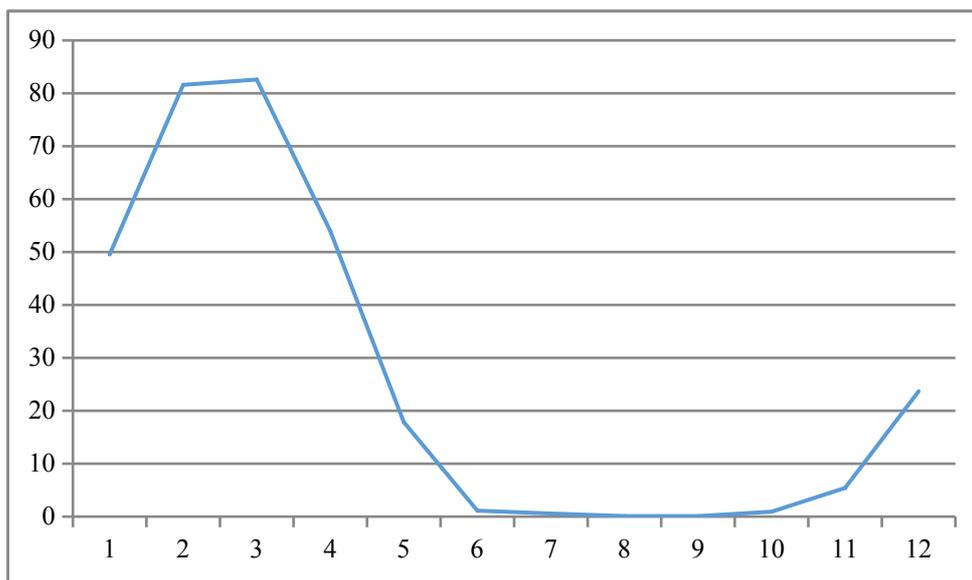


Рис. 2.1 График годового хода площади льда в Балтийском море, тыс. км²

Площадь льда (или приведенная ледовитость) - это характеристика ледового режима водного объекта, которая учитывает площадь льда, сплочённого до 10 баллов, то есть суммарную площадь всех льдин без водного пространства между ними. В отличие от обычной ледовитости, которая характеризует только площадь распространения льда, приведенная ледовитость отражает количество льда.

За последние десятилетия в акватории Балтийского моря чётко прослеживается заметная тенденция - ледовый покров неуклонно сокращается как по площади, так и по продолжительности ледового сезона. Если в 70-80-х годах прошлого века суровые зимы были нормой и море регулярно покрывалось мощным льдом на несколько месяцев, то сейчас такие зимы стали скорее исключением. Анализ данных показывает, что средняя

продолжительность ледового периода уменьшилась почти на месяц по сравнению с серединой XX века, а площадь максимального ледового покрытия сократилась на 20-30%. Особенно заметны изменения в восточной части моря-Финском и Рижском заливах, где раньше лёд держался по 5 месяцев, а теперь нередко сходит уже к началу мая. [14]

Для анализа тенденции сокращения количества льда были построены графики за года 1978-2024 для каждого из месяцев зимы.

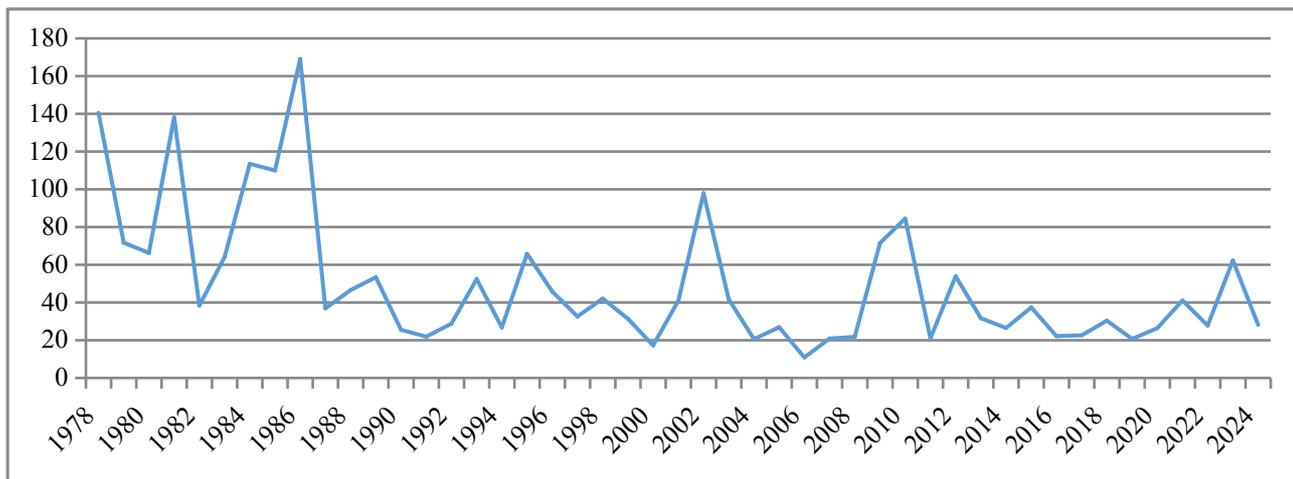


Рисунок 2.2. График среднегодовой площади льда за январь, тыс. км²

На графике за январь видно, что хоть и неравномерно, но с годами лед сокращается. На графике видно, что количество льда заметно сократилось после 1987 г. Так если средняя площадь ледяного покрова над акваторией до 1987 г. составляла 83,86 тыс. км², то после 1987 г - 36,04 тыс. км².

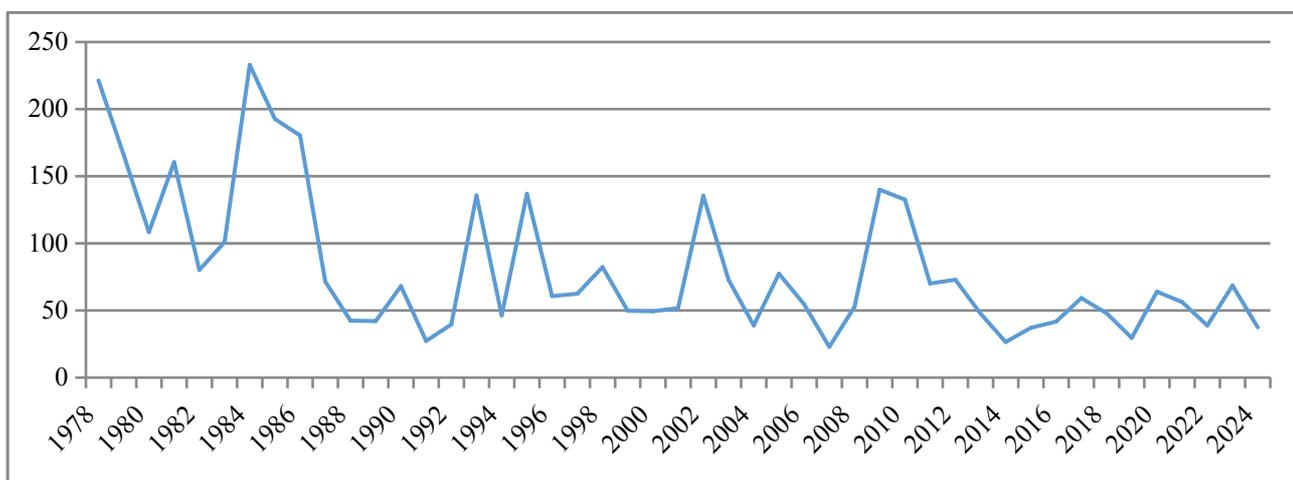


Рисунок 2.3. График среднегодовой площади льда за февраль, тыс. км²

В феврале до 1987 г средняя площадь льда наблюдалась 134,87 тыс. км², то после 1987 г - 62,7 тыс. км².

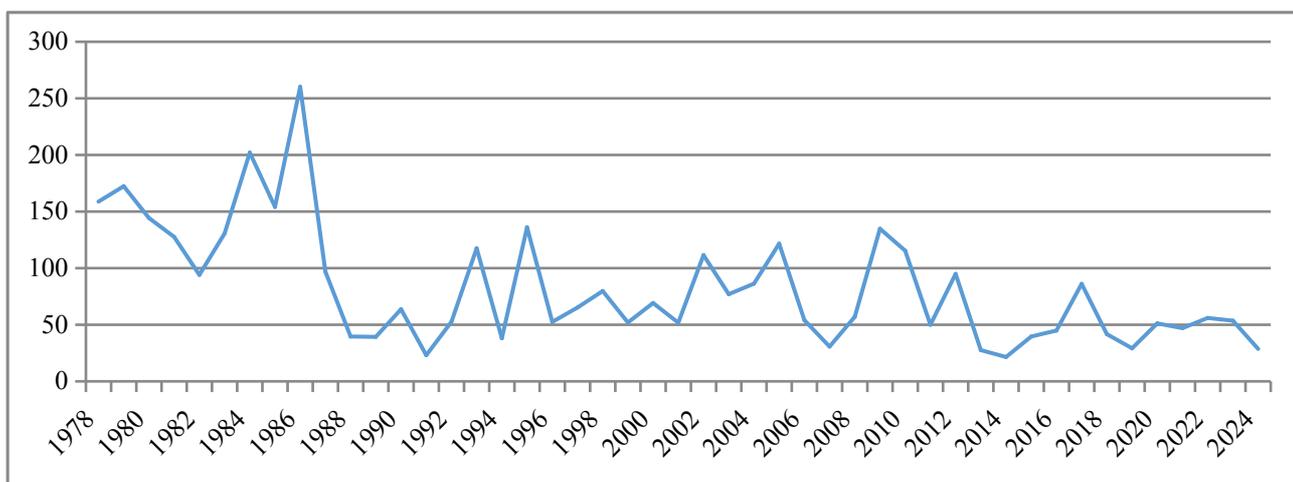


Рисунок 2.4. График среднегодовой площади льда за март, тыс. км²

В марте ситуация очень похожая, до 1987 среднемесячная площадь льда составляет 154,11 тыс. км², после 1987 г - 61,5 тыс. км².

А за последние 10 лет во все зимние месяцы общая площадь льда не превышала 100 тыс. км².

Этот процесс напрямую связан с глобальным потеплением - средние зимние температуры в регионе выросли, что критически влияет на процесс льдообразования. Только период потепления отмечается на 7 лет позже общепринятого, не с 1980 г, а 1987 г. [20]. Интересно, что сокращение ледового покрова идёт неравномерно - на фоне общего уменьшения встречаются отдельные аномально холодные зимы, как в 2010 году, когда лёд ненадолго возвращается к показателям прошлого века. Однако эти всплески подчёркивают общую тенденцию - климатические изменения делают Балтику все более открытой для навигации зимой, но при этом непредсказуемой.

2.3 Повторяемость брызгового обледенения различной интенсивности по месяцам.

За каждый месяц были построены карты повторяемости по трем градациям: легкое, умеренное и тяжёлое.

В ноябре можно наблюдать только лёгкое и умеренное обледенение. В Ботническом заливе вероятность легкого обледенения составляет от 6 % в южной его части до 20% - в северной. В Финском заливе - от 6% в западной части до 14% в восточной. В остальной части моря - до 4%. Образование умеренного обледенения возможно с вероятностью меньше 2% на всей акватории, за исключением северных районов Ботнического залива (2-6%).

В декабре повторяемость легкого обледенения в Ботническом и Финском заливах превышает 20%, в центральной части моря - от 10 до 20%. В южной части Балтийского моря возможно в 4-6% случаев. Умеренное обледенение также наиболее вероятно в Ботническом (2-18%) и Финском заливах (4-12%), над остальной частью Балтийского моря меньше 2%. Тяжелое обледенение в декабре в Ботническом заливе имеет повторяемость до 10%, в Финском - до 4%.

В декабре наибольшая вероятность появления легкого обледенения в акватории. Тяжелое же 20% может наблюдаться лишь у северного побережья Ботнического залива, остальная часть акватории с намного меньшей вероятностью может подвергаться данному обледенению. Умеренное же обледенение с большей вероятностью может наблюдаться в Ботническом и Финском заливе, но открытая акватория с маленькой вероятностью будет подвержена этому обледенению. (приложение А.)

В январе вероятность легкого обледенения составляет от 12% до 20% для южной части акватории и 20% на всей остальной части моря. Умеренное обледенение на юге моря с вероятностью до 6%, северная часть акватории открытой от 8% до 20%, а в Ботническом заливе 16-20%. Тяжелое обледенение практически на всей акватории вероятно с 2%, только в заливах высока вероятность обледенения 8-20% с выше вероятностью у побережья. Февраль будет месяцем с самыми большими вероятностями обледенения. Так легкое

может быть возможным с 20% на 80% акватории Балтийского моря. Тяжелое обледенение по прежнему может быть зафиксировано с высокой вероятностью лишь в заливах и с наименьшей в открытой акватории. А умеренное обледенение с большей вероятностью возможно в открытой акватории. (приложение А.)

В марте 20% легкого обледенения занимает лишь половину акватории на севере, умеренное обледенение 20% занимает заливы, открытая акватория с наименьшей вероятностью будет занята данным обледенением, вероятность же тяжелого обледенения еще меньше и будет наиболее вероятно лишь у побережий заливов. (приложение А.)

В апреле фиксируется лишь лёгкое обледенение 20% в Ботническом заливе. В центральной и южной части моря повторяемость легкого обледенения составляет 0-2%, оно есть, но с небольшой вероятностью,

Далее за май и летние месяца, включая осень до ноября обледенения нет.

2.4 Условия образования брызгового обледенения в Балтийском море.

Данные по расчётам показателя обледенения PPR мы использовали для построения графиков, чтобы проследить при каких температурах и ветре чаще всего наблюдалось брызговое обледенение. На графиках красный цвет обозначает тяжёлое обледенение, голубой - умеренное, а зелёный - лёгкое обледенение.

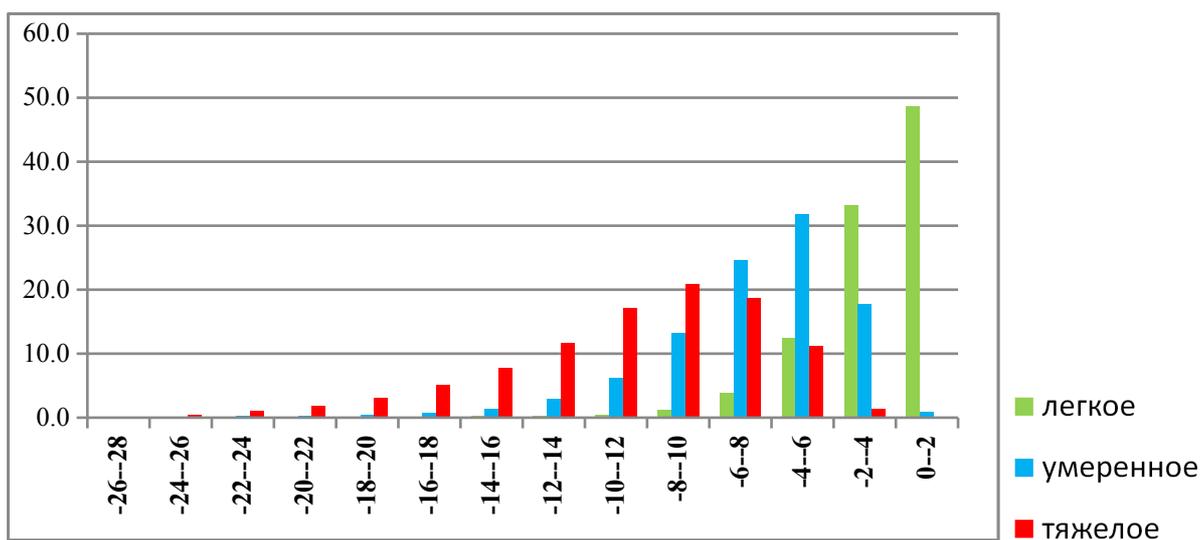


Рисунок 2.5. Повторяемость по градациям температуры воздуха для случаев тяжёлого, умеренного и лёгкого обледенения, °C

На рисунке 2.8 график показывает, когда температура опускается до $-8^{\circ}\text{C} \dots -10^{\circ}\text{C}$, возрастает риск тяжёлого обледенения, на эту градацию приходится 20% таких случаев. При температурах $0^{\circ}\text{C} \dots -2^{\circ}\text{C}$ наибольшая повторяемость лёгкого обледенения. (48%) Умеренное обледенение наиболее вероятно при $-4^{\circ}\text{C} \dots -6^{\circ}\text{C}$ в 32% случаев.

На графике (рисунок 2.9) представлена повторяемость лёгкого, умеренного и тяжёлого обледенения в зависимости от градаций температуры воды.

Наиболее благоприятными условия для возникновения для умеренного 56% и тяжёлого 88% брызгового обледенения будет температура воды равная $0^{\circ}\text{C} \dots -2^{\circ}\text{C}$, тогда как для лёгкого 37% обледенения - $+2^{\circ}\text{C} \dots 0^{\circ}\text{C}$.

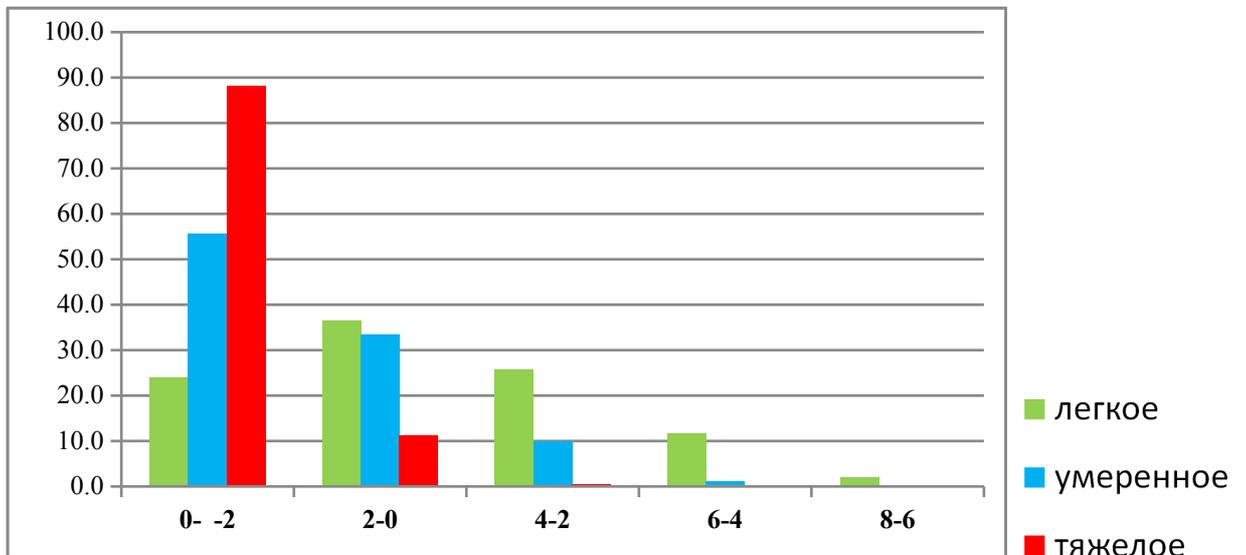


Рисунок 2.6. Повторяемость по градациям температуры воды для случаев тяжёлого, умеренного и лёгкого обледенения, °С

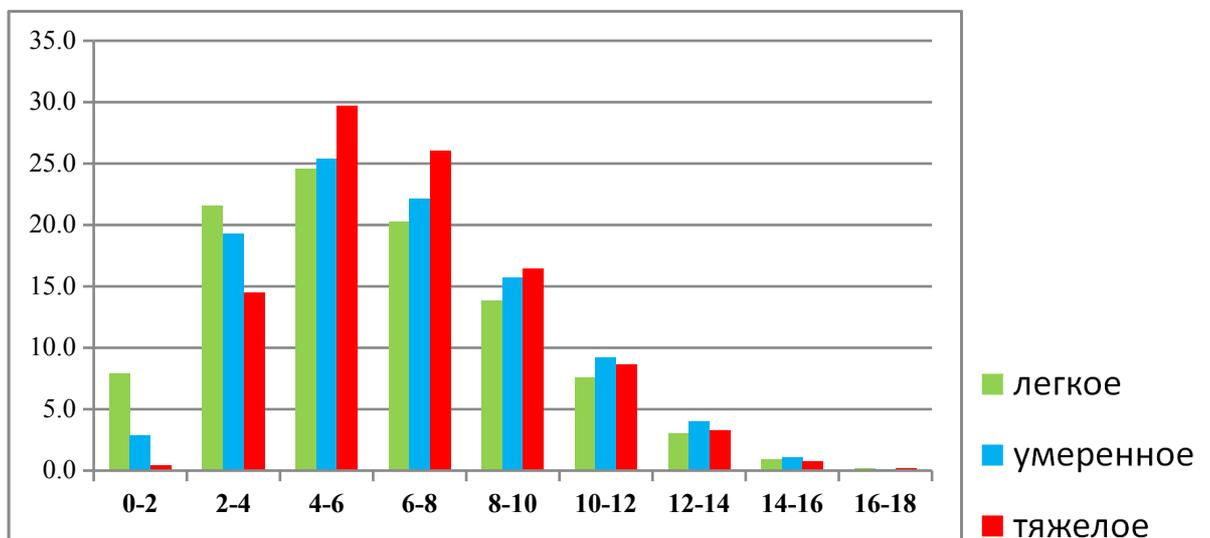


Рисунок 2.7. Повторяемость по градациям скорости ветра для случаев тяжёлого, умеренного и лёгкого обледенения, м/с

Следующий параметр оказывающий влияние на образование брызгового обледенения скорость ветра. Максимальная повторяемость всех трех градаций наблюдается при ветре со скоростью 4-6 м/с легкое 25%, умеренное 25% и тяжелое 30%. Тяжёлое 26% и умеренное 22% с меньшей повторяемостью находятся в скоростях 6-8 м/с, а вот лёгкое 21% обледенение чаще наблюдалось при 2-4 м/с. При штормовых ветрах обледенение тоже есть, но с маленькой вероятностью, такие скорости не часто встречаются.

Также была построена роза ветров, чтобы проследить характерные направления ветра над акваторией Балтики при легком, умеренном и тяжелом обледенении (рисунок 2.11)

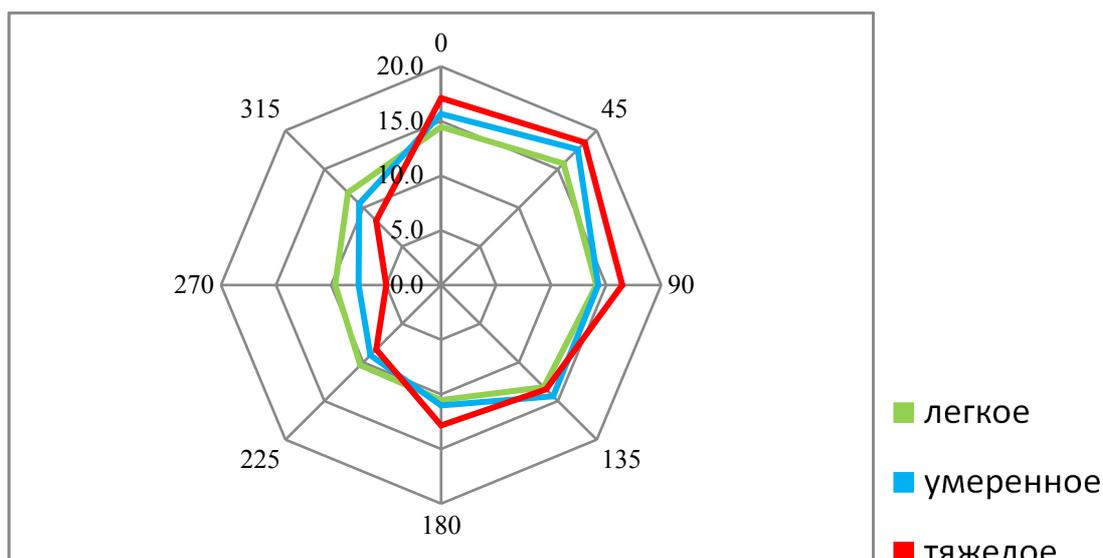


Рисунок 2.8. Повторяемость по направлению ветра для случаев тяжёлого, умеренного и лёгкого обледенения %

Самым частым случаем становится северо-восточное направление ветра для всех трёх градаций от 15 до 18%, но также частыми случаями являются ветра с направлением северным (от 15 до 17%) и восточным (14 до 16%). Меньше всего обледенение возникает при западных ветрах от 5 до 19% случаев. У тяжёлого обледенения. 18% наблюдается у тяжелого обледенения с северным, северо-восточным и восточным направлениями ветра. Те же 18% есть у северного и северо-восточного направления ветра для умеренного обледенения. Легкое в свою очередь 18% при северо-восточных направлениях.

2.5 Синоптический анализ случаев при тяжелом обледенении морских судов

Далее рассмотрены синоптические ситуации благоприятные для тяжелого обледенения, к каждому случаю посчитана занимаемая площадь в процентах от всей акватории.

Синоптическая ситуация за срок 28.02.2018г. 00 по UTC

Первый случай. Над Скандинавией расположился обширный антициклон, акватория Балтийского моря оказалась под влиянием его южной части. В зимний период антициклоны могут привести к сильным морозам, особенно при длительном стационарном положении. Данный антициклон мало подвижный и уже в стадии максимального развития. Сам антициклон пришёл с Арктики. Над акваторией Балтийского моря Ветра преимущественно восточные с температурой воздуха в зонах тяжелого обледенения -10°C , при умеренном -5°C .

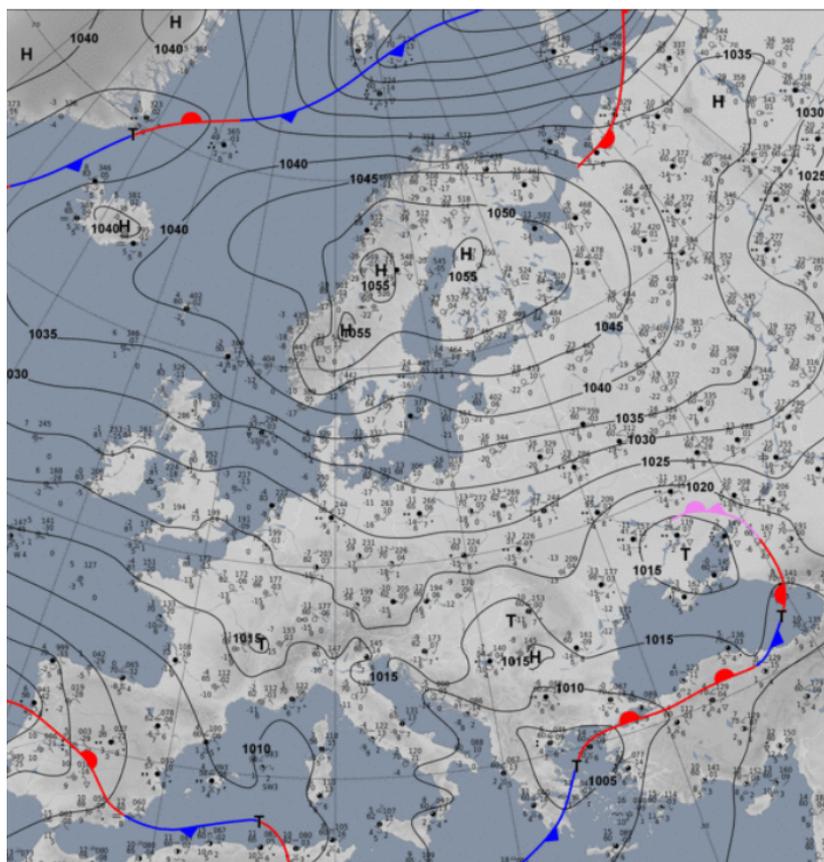


Рис.2.9. Синоптическая карта за 28.02.2018 г. 00 по UTC

Также была построена карта показателя обледенения с учётом кромки льда. Акватория полностью занята умеренным и тяжёлым обледенением, лёгкое не фиксировалось в этот срок.

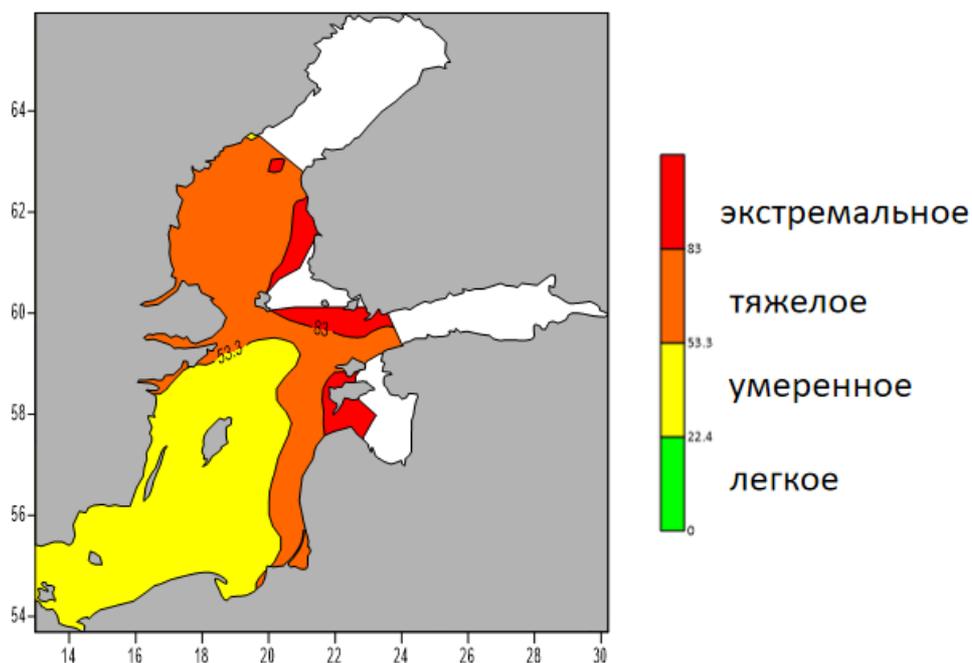


Рис. 2.10. Интенсивность брызгового обледенения по градациям за 28.02.2018 г. 00 по UTC

Такое влияние южной части квазистационарного антициклона благоприятно для образования тяжёлого обледенения, которое в этот срок составило 33,8% от общей площади акватории Балтийского моря. Экстремальное обледенение наблюдалось по побережьям заливов, ближе к открытому морю было тяжёлое, оставшуюся открытую акваторию заняло умеренное обледенение.

Синоптическая ситуация за 03.02.2012г. 00 по UTC.

На данном сроке Балтийское море находится в западной части антициклона. Центр расположен над севером ЕТР. Проследив за антициклоном и его развитием, можно сказать, что данный антициклон стационарный, высокий с давлением 1055 гПа в центре.

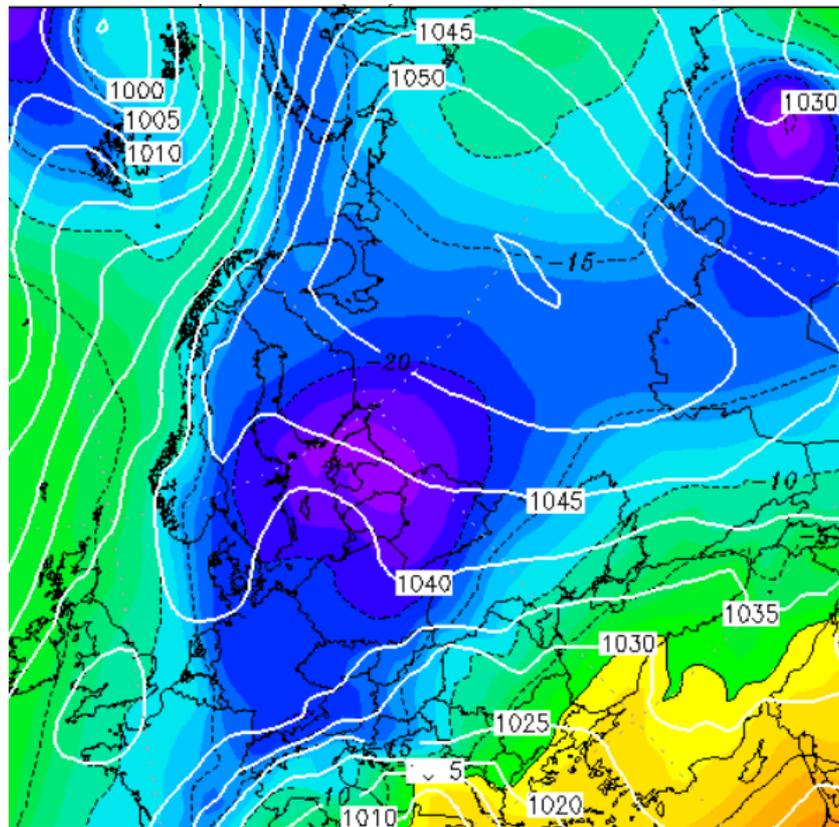


Рис. 2.11. Синоптическая карта и поле температуры на уровне.... за
03.02.2012 00 по UTC. Реанализ NOAA

В этот срок зона с благоприятными условиями для образования тяжёлого и экстремального брызгового обледенения составляла 25,8% от все акватории Балтийского моря.

Экстремальное обледенение заняло юго-восточное побережье, тяжёлое чуть дальше у побережья, умеренное было в части открытой акватории и закрыло собой все юго-западное и западное побережья, лёгкое было на юге акватории.

В этот срок наблюдается пониженная температура воздуха, высокая влажность, умеренный ветер, усиливающий обледенение. Для тяжелого обледенения температура была $-11^{\circ}\text{C} \dots -13^{\circ}\text{C}$. Для умеренного температура была $-7^{\circ}\text{C} \dots -9^{\circ}\text{C}$, а легкое могло наблюдаться при температуре равной $-5^{\circ}\text{C} \dots -7^{\circ}\text{C}$.

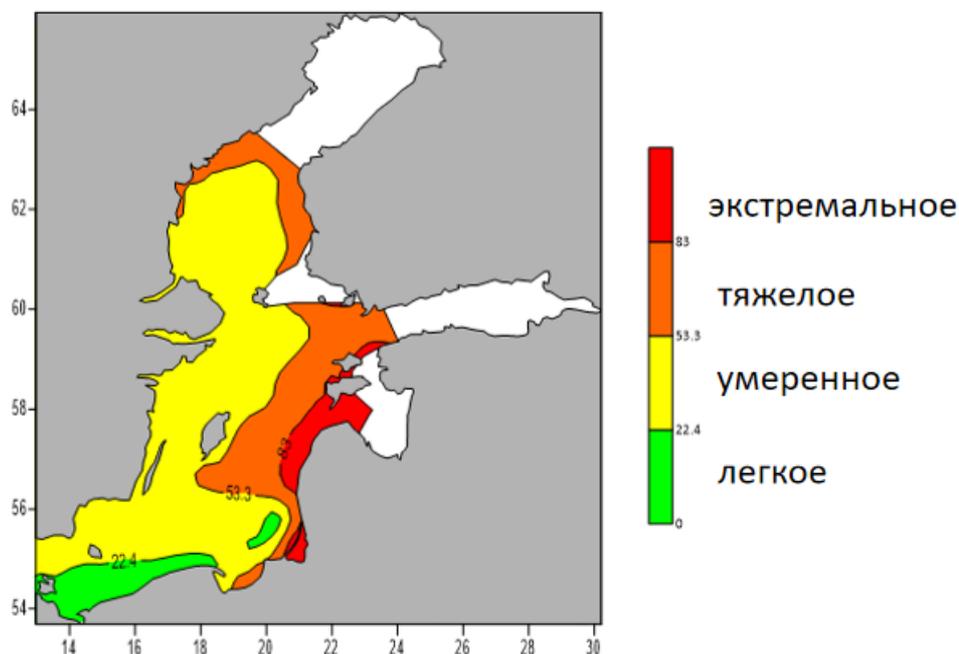


Рис.2.12. Интенсивность брызгового обледенения по градациям за 03.02.2012 г

Синоптическая ситуация за 24.12.2010г. 12ч по UTC.

На большую часть территории Балтийского моря оказывает влияние ложбина циклона с центром над северной территорией Италии и давлением 1005 гПа. Ботнический залив находится под влиянием малоградиентного поля между двумя циклонами, ветра слабые.

Температура в зоне тяжелого обледенения за этот срок была $-6^{\circ}\dots-8^{\circ}$, умеренный $-5^{\circ}\dots-7^{\circ}$ для северной части акватории $-2^{\circ}\dots-4^{\circ}$. Легкое обледенение было при температуре равной $0^{\circ}\dots-2^{\circ}$.

Ветер за данный срок при тяжелом обледенении был 8-10 м/с, умеренное 10-12 м/с, а легкое 12-14 м/с, а порывы ветра могли над акваторией легкого обледенения доходить до 20 м/с.

Тяжелое брызговое обледенение в этот срок составило 22,5% от общей акватории. На карте (рисунок 2.17) видно, что за данный срок, площадь обледенения уже была меньше, так в открытой акватории вообще не наблюдалось обледенение, север и часть восточной акватории покрыло тяжёлое обледенение, зона умеренного располагалась южнее.

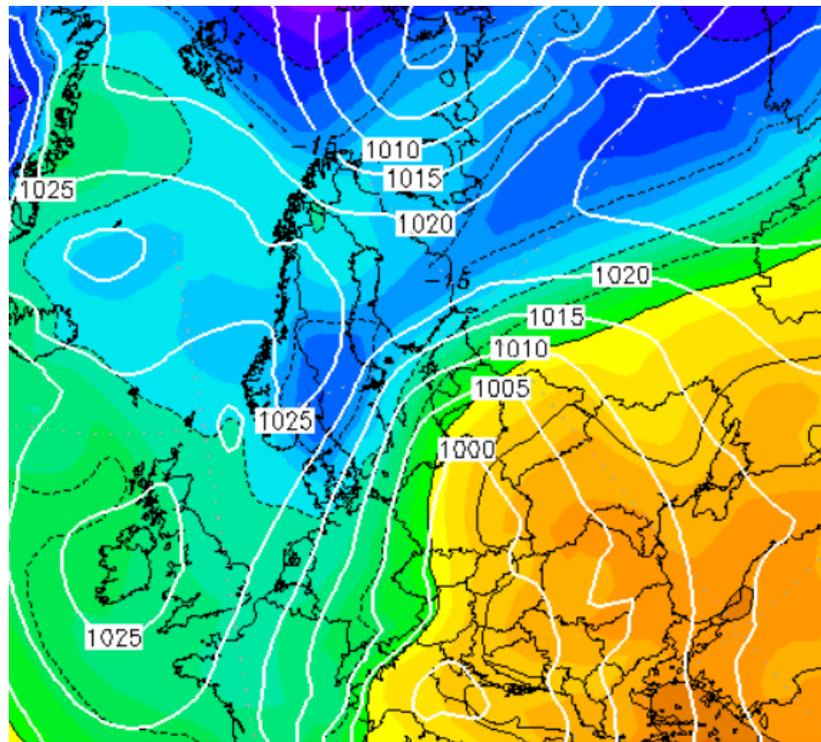


Рис. 2.13. Синоптическая карта и поле температуры на уровне 850 гПа за 24.12.2010г. 12ч по UTC. Реанализ NOAA

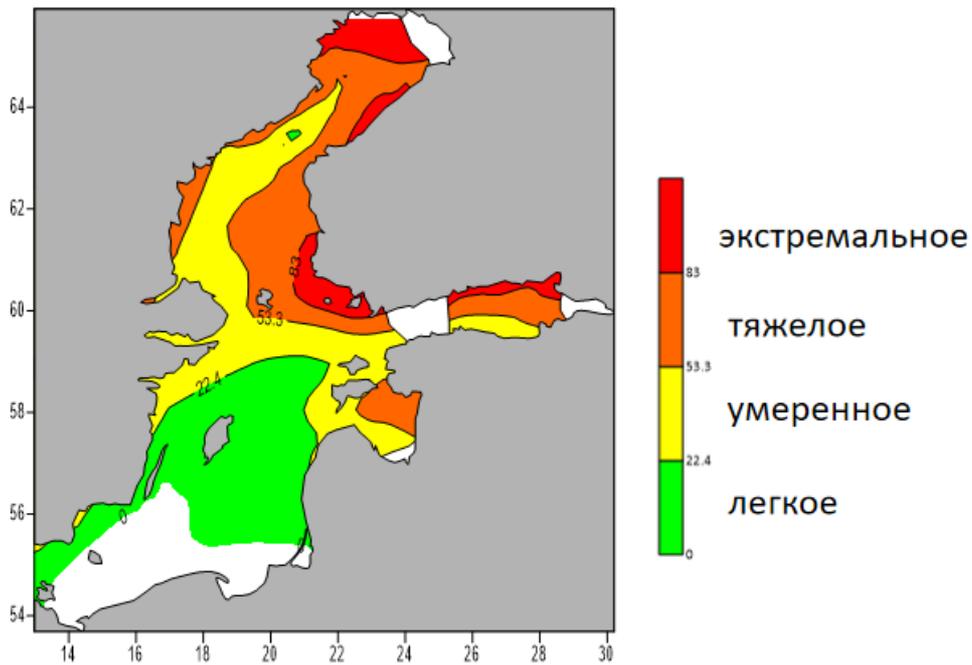


Рис.2.14. Интенсивность брызгового обледенения по градациям за 24.12.2010г. 12ч по UTC

Синоптическая ситуация за 15.02.2011г. 00ч по UTC

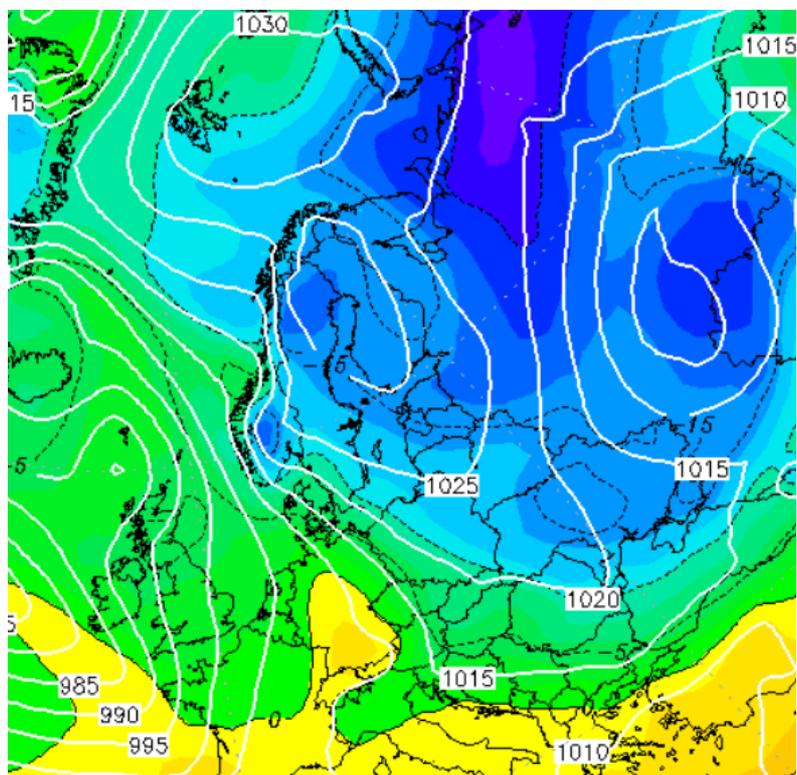


Рис. 2.15. Синоптическая карта и поле температуры на уровне 850 гПа за 15.02.2011 г. 00ч по UTC. Реанализ NOAA

На акваторию оказывает влияние антициклон. Центр антициклона находится над Ботническим заливом. Это уже третья ситуация в синоптическом анализе, когда брызговое обледенение обуславливается антициклональной погодой, низкие температуры и высокая влажность дают отличные условия для образования льда на бортах судна. Температура в заливах была $-18^{\circ}\text{C} \dots -20^{\circ}\text{C}$, открытая часть акватории на севере $-10^{\circ}\text{C} \dots -12^{\circ}\text{C}$, а на юге $-5^{\circ}\text{C} \dots -7^{\circ}\text{C}$. Ветер над Балтийским морем на севере был 2-4 м/с, в центре 6-8 м/с, а на юге 10-12 м/с, порывы на юге доходили до 17 м/с. Тяжёлое брызговое обледенение составила в этот срок 22% от всей акватории моря.

Синоптическая ситуация за 27.02.2018г. 00ч по UTC

Тяжёлое брызговое обледенение составило в этот срок 16,3%.

На территорию вновь существенное влияние оказывает антициклон, его юго-западная часть. Давление в центре антициклона составило 1052 гПа. Это характерный случай, как и в других ситуациях, антициклон в зимнее время года способен провоцировать опасное обледенение. С 23.02.2018 центр располагался над Скандинавским полуостровом, 26.02.2018 антициклон имел три центра над

Скандинавским полуостровом и выше над Северно-ледовитым океаном. Юго-западный ветер, скорость на севере была 8-10 м/с, в центре акватории 11-13 м/с, а на юге 5-7 м/с.

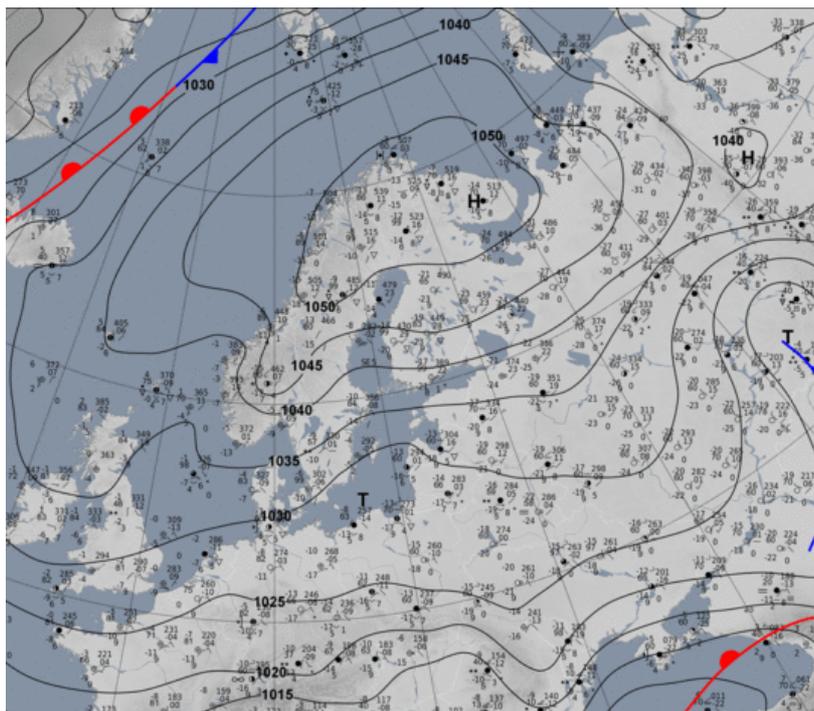


Рис. 2.16. Синоптическая карта за 27.02.2018 г. 00ч по UTC.

Синоптическая ситуация за 15.01.2024 г. 12ч по UTC.

В данный срок над Балтийским морем расположился циклон. Над морем наблюдаются фронты окклюзии для которых характерны порывистые ветра. Циклон на стадии развития (углубления) давление каждый день падает, ветер усиливается, и циклоническая система развивается, образуя мощные облачные структуры, такие как шквалы и грозы. Порывы ветра в центре моря могут достигать 27 м/с. Давление в центре 976 гПа, а высота волн может достигать 2,8 м. Сам циклон пришел с севера, 12.01.2024 он был над Скандинавским полуостровом с давлением 1005 гПа.

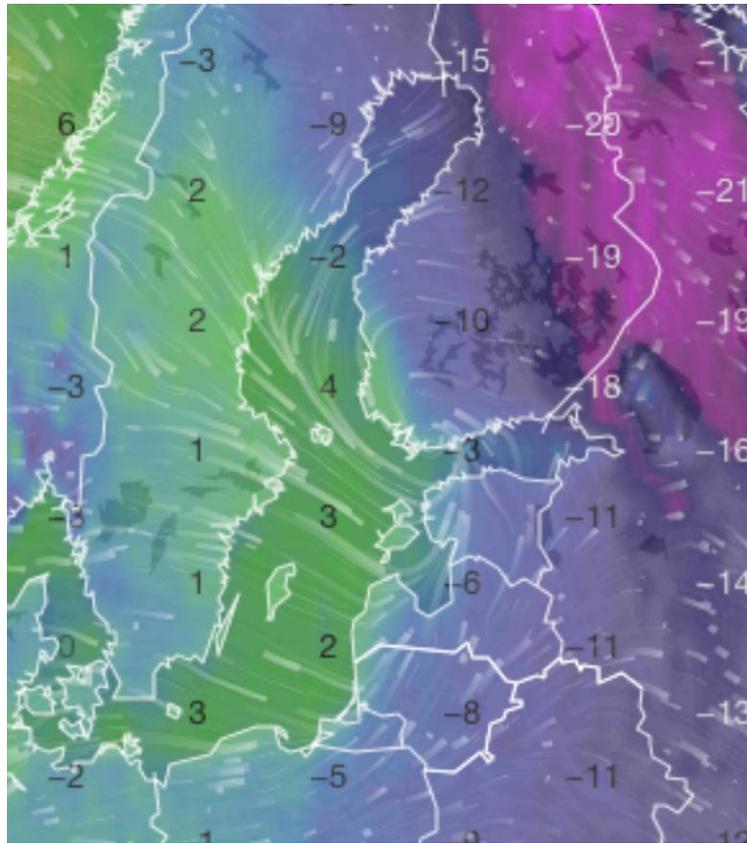


Рис. 2.17. Температура воздуха над Балтийским морем за 15.01.2024 г. 12ч по UTC.[17] Модель ICON, реанализ DWD.

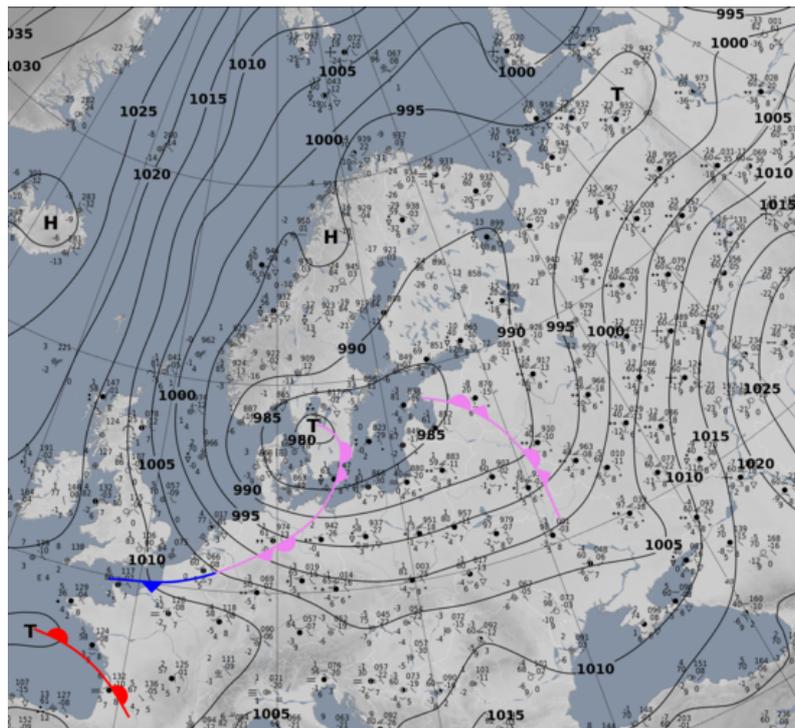


Рис. 2.18. Синоптическая карта за 15.01.2024 г. 12 по UTC.

Брызговое обледенение в этот срок составило 13,9% от всей площади Балтийского моря.

Синоптическая ситуация за 17.03.2018 г. 12 по UTC.

Над скандинавским полуостровом расположен центр антициклона с давлением 1040 гПа, влияние на Балтийское море оказывает восточная периферия антициклона. Антициклон пришел с запада со стороны Гренландии 11.03.2018, 16.03.2018 он имел несколько центров над полуостровом. Сам антициклон на стадии максимального развития, в следующие дни давление будет уже падать и он уйдет в Атлантический океан. Температура воздуха на Балтийском море распределена равномерно, без сильных изменений $-4^{\circ}\text{C} \dots -8^{\circ}\text{C}$, скорость ветра также распределена без большого разброса 5-9 м/с, но на юге у Датских проливов ветер 16 м/с, который поднимает волны до 3,9 м.

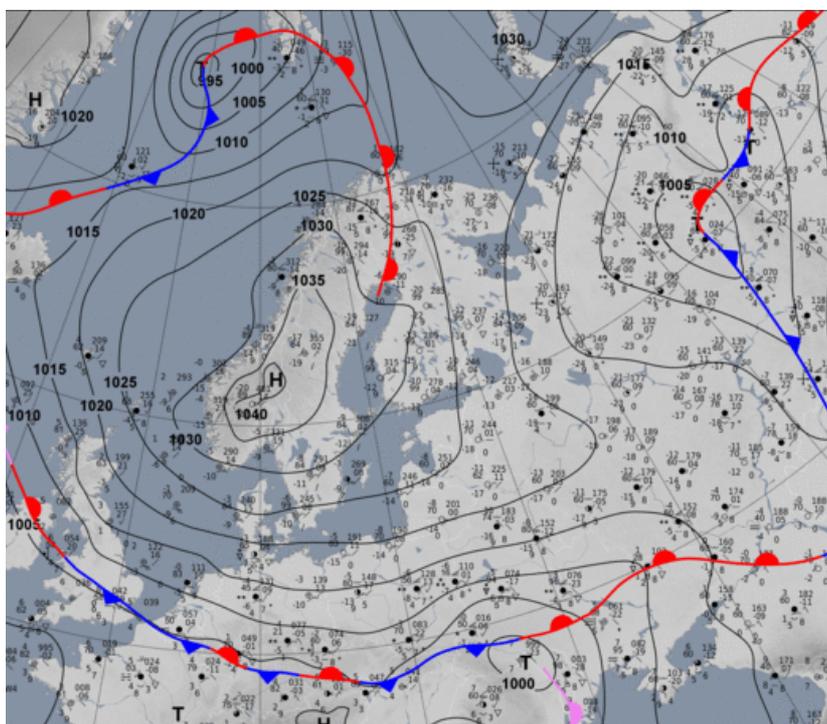


Рис. 2.19. Синоптическая карта за 17.03.2018 г. 12 по UTC.

Тяжелое брызговое обледенение в это срок составило 15% от всей площади Балтийского моря.[13]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование обледенения судов в Балтийском море позволило выявить ключевые закономерности этого опасного гидрометеорологического явления. Анализ данных нам показал, что наиболее интенсивное обледенение наблюдается в восточной части моря - Финском и Рижском заливах, а также Ботническом заливе на севере, это дало сочетание низких температур воздуха, ветра и температуры воды.

Основными факторами, способствующими обледенению стали:

1. Температура воздуха для легкого $0^{\circ}\text{C} \dots -2^{\circ}\text{C}$ 48%, для умеренного $-4^{\circ}\text{C} \dots -6^{\circ}\text{C}$ 32%, для тяжелого $-8^{\circ}\text{C} \dots -10^{\circ}\text{C}$ 20%.
2. Температура воды для легкого $+2^{\circ}\text{C} \dots 0^{\circ}\text{C}$ 37% , для умеренного 56% и тяжелого 88% $0^{\circ}\text{C} \dots -2^{\circ}\text{C}$.
3. Скорость ветра для легкого, умеренного и тяжелого 4-6 м/с 25%, 25% и 30% соответственно, преимущественно северо-восточные направления 16%, 18% и 18%.

В ходе исследования выявлено, что наиболее благоприятными синоптическими ситуациями для образования умеренного и тяжёлого обледенения являются ситуации с влиянием обширных квазистационарных антициклонов.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для многих отраслей, для судоходных компаний - позволяет оптимизировать маршруты и графики зимней навигации. Для проектировщиков судов - дают основания для совершенствования антиобледенительных систем. Для метеорологических служб - указывают на необходимость уточнения критериев прогнозирования.

Перспективными направлениями дальнейших исследования могут стать разработки региональных моделей обледенения с учётом климатических изменений, изучение влияния солёности воды на интенсивность процесса, а также создание рекомендаций по эксплуатации судов в новых ледовых условиях.

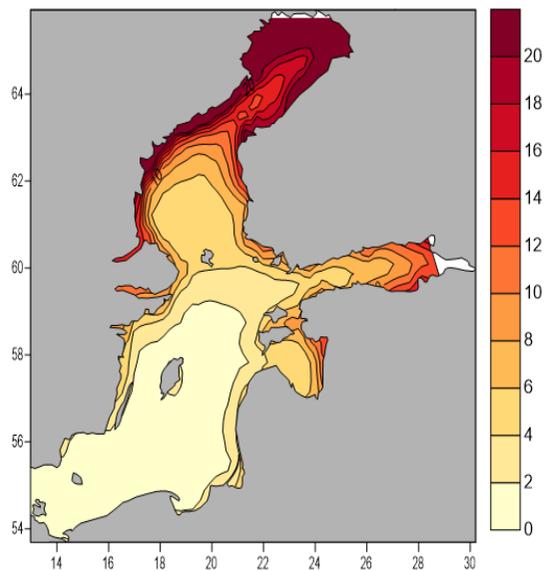
Проведённая работа подтвердила необходимость постоянного мониторинга и анализа случаев обледенения в условиях меняющегося климата Балтийского региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

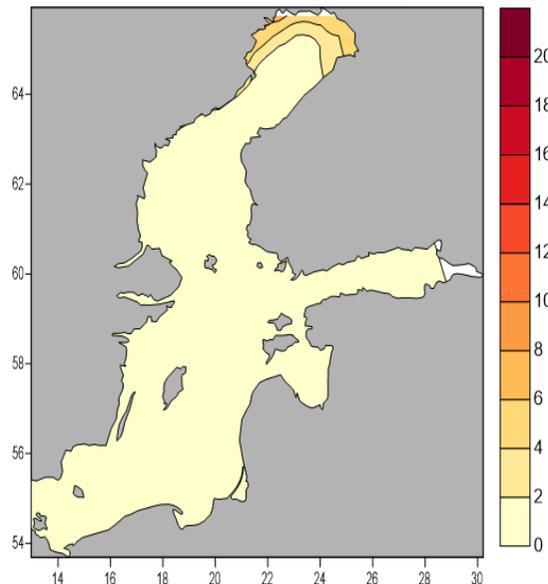
1. Географическое положение и границы Балтийского моря // Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане URL:http://esimo.oceanography.ru/esp2/index/index/esp_id/1/section_id/2 (дата обращения: 13.04.2025)
2. Климатический очерк// Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане URL:http://esimo.oceanography.ru/esp2/index/index/esp_id/1/section_id/5/menu_id/4563 (дата обращения 13.04.2025)
3. Ледовые условия// Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане URL:http://esimo.oceanography.ru/esp2/index/index/esp_id/1/section_id/9(дата обращения 13.04.2025)
4. В.В. Новиков, М.В. Китаев, К.А. Молоков Основы обеспечения ледовой прочности морских судов. -Владивосток: редакционно-издательский отдел Политехнического института ДВФУ, 2022. - 140с.
5. Затонувшее в Новороссийске судно «Ашамба» может восстановить спонсор// РБК URL:<https://kuban.rbc.ru/krasnodar/freenews/683ef9179a7947563e5372f0> (дата обращения 05.06.2025)
6. Л.Г. Качурин, И.А. Смирнов, Л. И. Гашин Обледенение судов. - 2-е изд. - Ленинград: Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ), 1980. - 56с.
7. «Правила классификации и постройки морских судов» от 01.01.2019 НД № 2-020101-114// Росийский морской регистр судоходства. -2019г.- №1
8. В.И. Дымов, Н.П.Яковлева, Т.А. Пасченик, В.В. Алексеев Численные методы расчета брызгового обледенения судов// Проблемы Арктики и Антарктики. - 2012. - №2(92). - С. 19-26.

9. С.И. Мاستрюков Оценка отечественных и зарубежных методов расчета брызгового обледенения судов// Навигация и гидрография.-2011.-№31.-С. 81-86
10. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present // Climate Data Store URL:<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> (дата обращения 20.03.2025)
11. World Ocean Atlas 2023 Data//National Centers for Environmental Information URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-atlas-2023/> (дата обращения 20.03.2025)
12. Наставление по службе прогнозов «Служба морских гидрологических прогнозов» от 21.11.2011 №52.27.759-2011 // ЦМТР ФГБУ «НПО «Тайфун». - 2011г. - №3.- Ст.3
13. Archiv NOAA (1936-2015)// wetterzentrale URL: <https://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php?model=noaa> (дата обращения 02.03.2025)
14. Изменение климата меняет экосистему Балтийского моря//Это Финляндия URL: <https://finland.fi/ru/> (дата обращения 05.06.2025)
15. Где на карте океанов находится Балтийское море// KachelOff.ru URL:<https://kacheloff.ru/photos/gde-na-karte-okeanov-nahoditsya-baltiyskoe-more/14> (дата обращения 05.06.2025)
16. О происшествии с т/х «Капитан Воронин» (Завершение 26.09.21) // Министерство транспорта Российской Федерации ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА (Росморречфлот) URL: https://morflot.gov.ru/novosti/operativnaya_informatsiya/n5536/ (дата обращения 05.06.2025)
17. Ventusky // URL: <https://www.ventusky.com/>
18. IMO // URL :<https://www.imo.org/>
19. DNV // URL : <https://www.dnv.com/>
20. Изменение климата России и земного шара//ИГКЭ URL: <http://www.igce.ru/climatechange/>

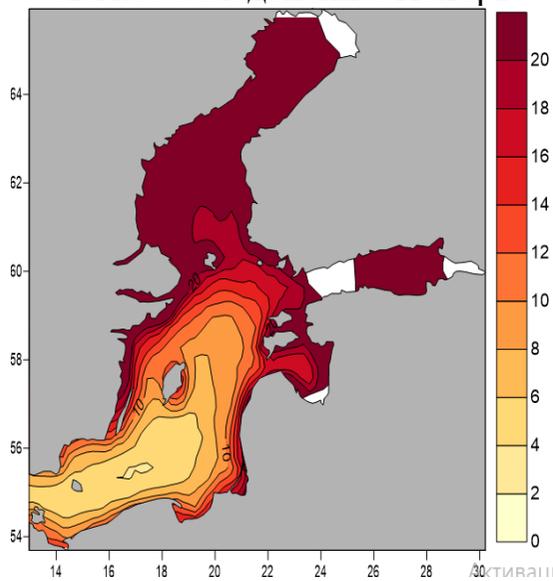
Приложение А. Повторяемость брызгового обледенения по градациям интенсивности на акватории Балтийского моря, %



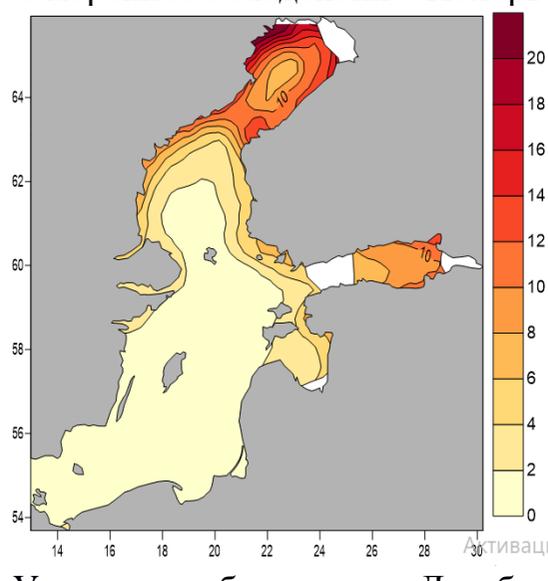
Легкое обледенение. Ноябрь



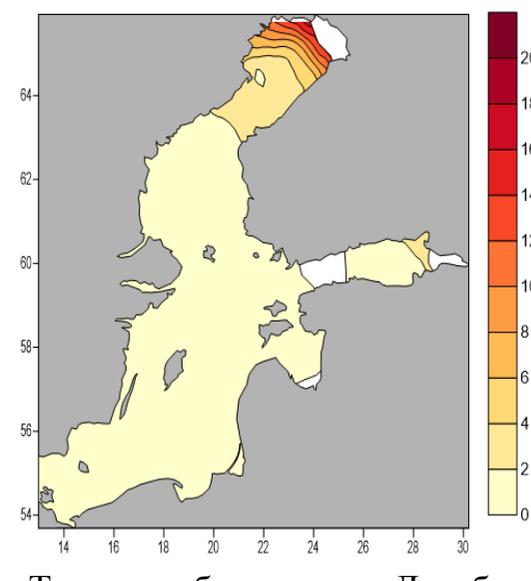
Умеренное обледенение. Ноябрь



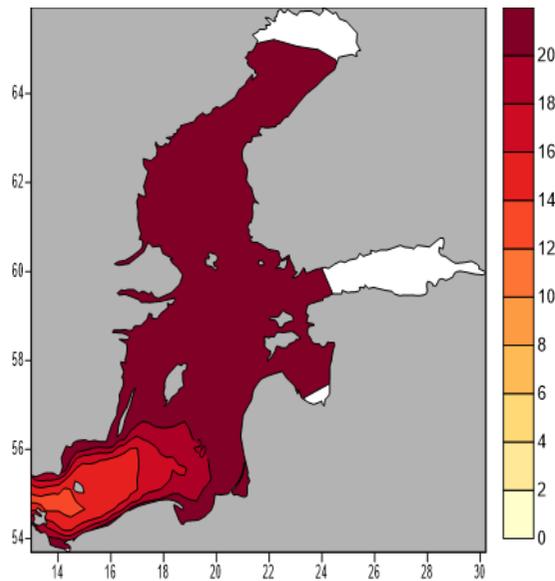
Легкое обледенение. Декабрь



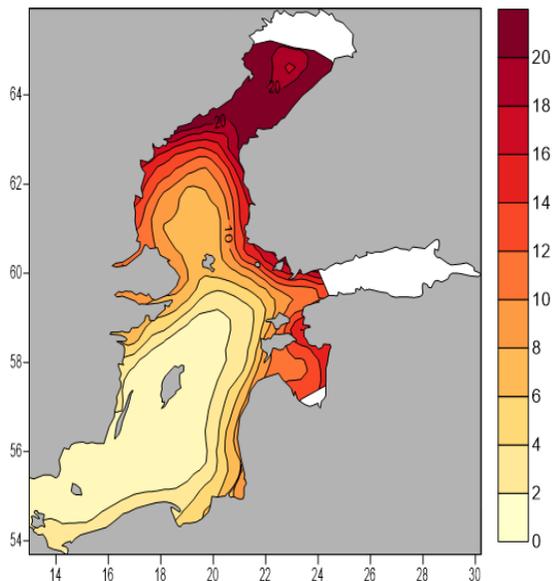
Умеренное обледенение. Декабрь



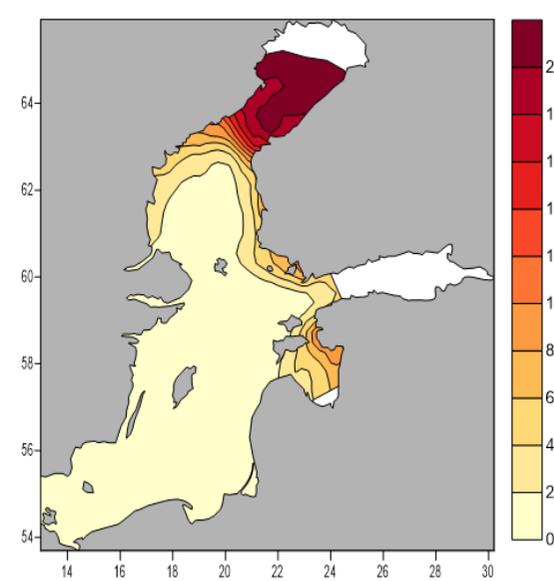
Тяжелое обледенение. Декабрь



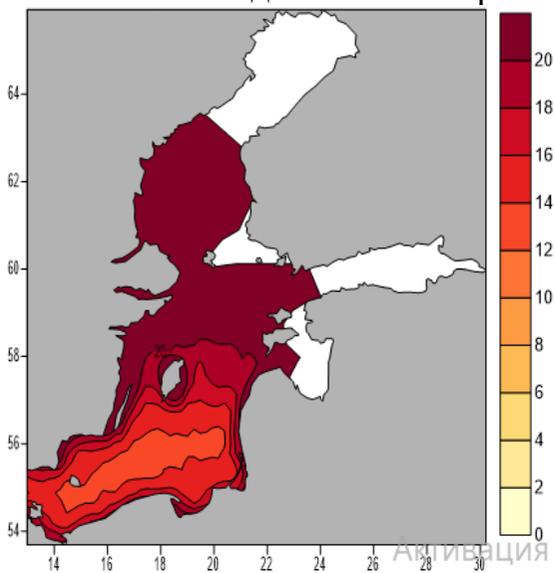
Легкое обледенение. Январь



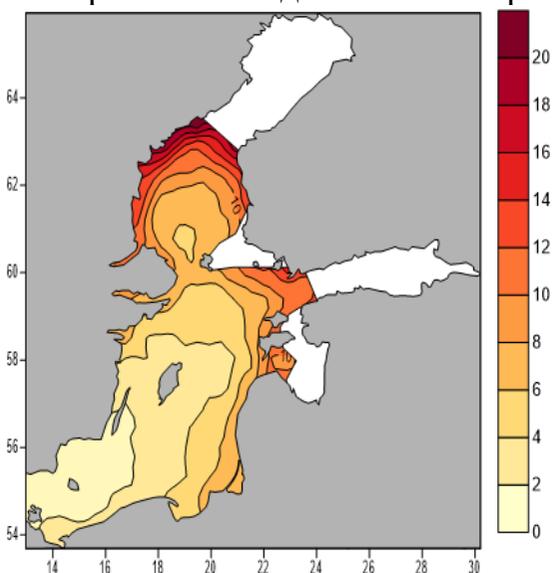
Умеренное обледенение. Январь



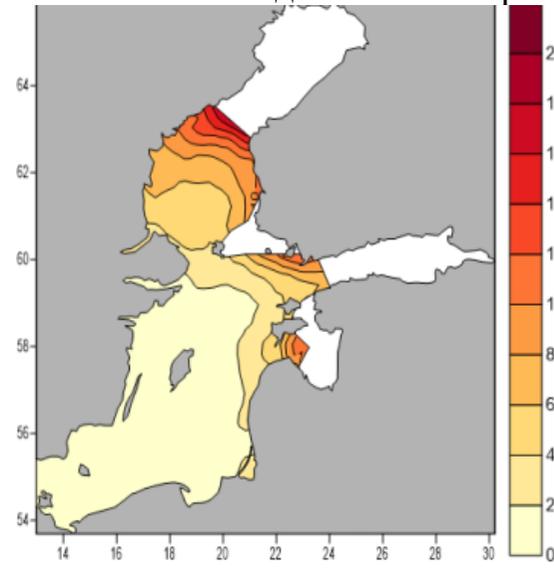
Тяжелое обледенение. Январь



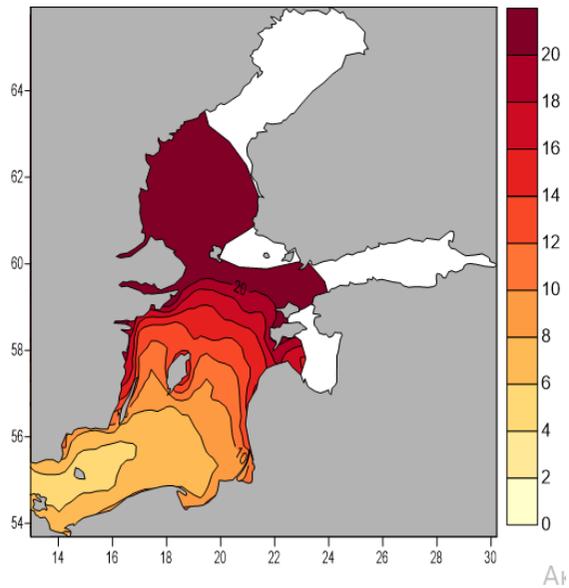
Легкое обледенение. Февраль



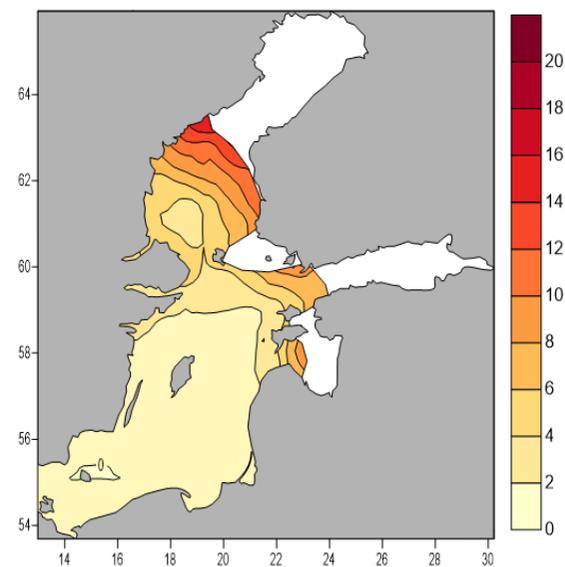
Умеренное обледенение. Февраль



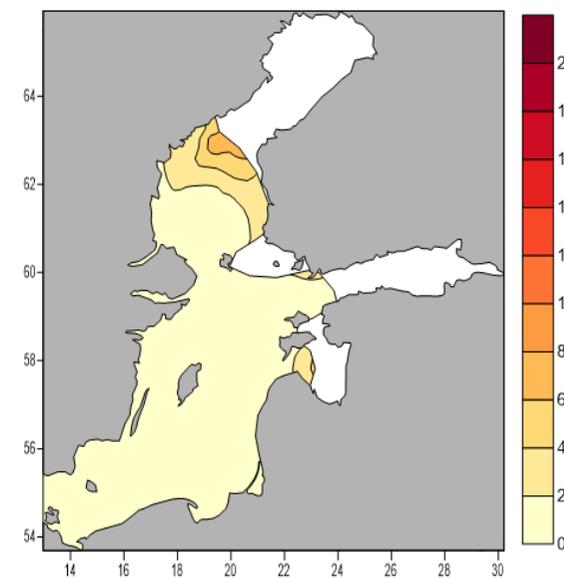
Тяжелое обледенение. Февраль



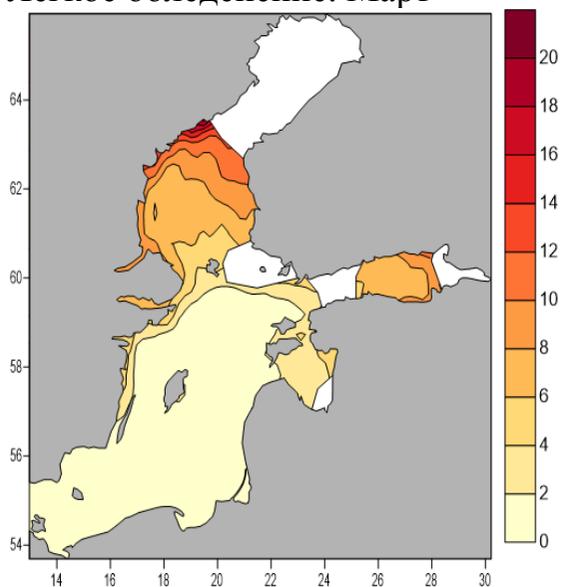
Легкое обледенение. Март



Умеренное обледенение. Март



Тяжелое обледенение. Март



Легкое обледенение. Апрель