



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ПО и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Анализ формирования ветро-волновых условий на входе в бухту
Север Енисейского залива»

Исполнитель: Аралова Дана Ермековна

Руководитель: к.г.н., доцент, Чанцев Валерий Юрьевич

«К защите допускаю»

И.о. заведующего кафедрой

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«М.» Ов 2025г.

г. Санкт-Петербург

2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ	7
1.1. Физико-географическое положение и орография	7
1.1.1. Общее географическое положение и границы Енисейского залива	7
1.1.2. Расположение и морфометрия бухты Север	9
1.1.3. Геолого-геоморфологическое строение и рельеф побережья	9
1.1.4. Морфометрические характеристики и изрезанность береговой линии	10
1.1.5. Ландшафты и растительный покров	12
1.2. Особенности рельефа дна Енисейского залива	12
1.3. Климатические и метеорологические условия	14
1.4. Гидрологический режим	15
1.5. Основные синоптические процессы и ветровой режим	18
1.5.1. Зимний период (октябрь – апрель)	18
1.5.2. Летний период (июнь – август)	19
1.5.3. Переходные сезоны (май, сентябрь – начало октября)	19
1.6. Ветро-волновые условия	20
ГЛАВА 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ	22
2.1. Описание численной модели Delft3D	22
2.1.1. Расчетные модули и ключевая роль Delft3D-FLOW	23
2.1.2. Модуль расчета волнения Delft3D-WAVE и модель SWAN	30
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ВЕТРО-ВОЛНОВОГО РЕЖИМА	34

3.1. Исходные параметры модели	34
3.2. Анализ полей течений	38
3.3. РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛНЕНИЯ	44
3.3.1 Высота волн (H_{sig}).....	44
3.3.2. Средний период волн.....	54
3.3.3. Средняя длина волны.....	60
3.3.4. Крутизна волны.....	66
3.3.5. Уровень воды.....	70
3.4. Временная изменчивость	75
Заключение	80
Список использованной литературы	82

ВВЕДЕНИЕ

Арктическая зона Российской Федерации в последние десятилетия стала ареной активного экономического освоения. Развитие Северного морского пути (СМП), освоение месторождений углеводородов на шельфе и побережье, строительство портовой инфраструктуры и модернизация существующих транспортных узлов требуют детального и всестороннего изучения гидрометеорологических условий арктических морей [1, 11]. Безопасность мореплавания, эффективность и экологическая состоятельность хозяйственной деятельности напрямую зависят от точности прогнозирования и полноты знаний о сложнейших природных процессах, протекающих в высоких широтах [20].

Енисейский залив Карского моря является одним из ключевых районов СМП. Это важнейшая водная артерия, связывающая внутренние водные пути Сибири с океаном и обеспечивающая вывоз продукции промышленных центров Красноярского края [22]. Устьевая область Енисея представляет собой уникальный по своим масштабам и сложности гидрологических процессов эстуарий, где гигантский речной сток встречается с морскими водами, формируя сложную систему течений, фронтальных зон и специфический ледовый режим [6, 9].

Особую актуальность приобретает изучение локальных ветроволновых условий в заливах и бухтах, которые служат местами базирования флота, строительства терминалов и проведения погрузо-разгрузочных работ. Ветровое волнение является одним из наиболее опасных явлений для судоходства и прибрежных сооружений [13]. Его параметры – высота, длина, период и направление распространения волн – определяются скоростью и направлением ветра, продолжительностью его действия, размерами разгона волн, а также морфологией и батиметрией акватории.

Настоящая дипломная работа посвящена анализу формирования ветро-волнового режима на подходе к бухте Север, расположенной в восточной части Енисейского залива. Выбор данного района обусловлен его важным навигационным значением и недостаточной изученностью локальных волновых процессов. Понимание механизмов трансформации волн при заходе в бухту из открытой части залива имеет большое практическое значение для обеспечения безопасности навигации и планирования морских операций [10].

Актуальность дипломной работы заключается в необходимости получения детальных характеристик ветро-волновых условий в конкретном, практически значимом районе Енисейского залива на основе современных данных. Комплексный анализ данных за навигационный период позволит выявить основные закономерности формирования волнения и его связь с синоптической обстановкой.

Целью дипломной работы является анализ формирования ветро-волновых условий на входе в бухту Север Енисейского залива на основе контактных измерений и численного моделирования за период май-октябрь 2020 года.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выполнен сбор и систематизация литературных данных по физико-географическим и гидрометеорологическим условиям района Енисейского залива.
2. Проведен анализ синоптических условий, определяющих ветровой режим в районе за указанный период.
3. Осуществлен статистический анализ рядов данных по ветру, волнению и течениям, полученных в ходе натурных наблюдений.
4. Выявлены основные закономерности формирования и изменчивости ветро-волновых полей на входе в бухту Север.

5. Оценена степень влияния локальных факторов (очертания береговой линии, рельеф дна) на трансформацию ветровых волн.

Объектом дипломной работы выступают ветро-волновые условия на акватории Енисейского залива. Предметом является формирование и изменчивость параметров ветрового волнения на входе в бухту Север.

В работе были использованы данные по ветру, волнению и течениям, полученные с помощью автономных измерительных комплексов в период с мая по октябрь 2020 года. Обработка и анализ данных проводились с использованием стандартных методов океанографии и статистического анализа.

Практическая значимость заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы проектными организациями при планировании строительства и эксплуатации портовых сооружений, а также судоходными компаниями для оптимизации маршрутов и обеспечения безопасности мореплавания в данном районе Енисейского залива [1].

ГЛАВА 1. РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Физико-географическое положение и орография

1.1.1. Общее географическое положение и границы Енисейского залива

Енисейский залив, один из крупнейших в Российской Арктике, представляет собой эстуарий классического типа, образовавшийся в результате затопления морскими водами нижнего течения реки Енисей в эпоху послеледниковой (голоценовой) морской трансгрессии [8]. Он глубоко, на расстояние более 225 км, вдаётся в побережье Сибири, являясь естественным водным путем, соединяющим внутренние районы континента с акваторией Карского моря и, далее, с Северным Ледовитым океаном. Общая площадь акватории залива составляет около 20 тыс. км² [5].

Залив вытянут в меридиональном направлении и служит границей между двумя совершенно различными по своему строению и рельефу территориями. С запада его акваторию ограничивает низменный, изобилующий озерами термокарстового происхождения Гыданский полуостров. С востока же к заливу подступают скалистые и расчлененные северные отроги Таймырского полуострова, формирующие принципиально иной тип побережья [4]. Административно вся акватория и прилегающие земли входят в состав Таймырского Долгано-Ненецкого района Красноярского края.

Географические границы залива определяются следующим образом:

Северная граница (вход в залив): Условная линия, проходящая по параллели $73^{\circ}25'$ с.ш. от мыса Сопочная Карга на западном берегу до мыса Ефремов Камень на восточном. Ширина залива в этой части достигает максимальных значений – около 150 км.

Южная граница: Считается, что залив оканчивается в районе Бреховских островов (приблизительно $71^{\circ}50'$ с.ш.), где он переходит в сложную систему проток многорукавной дельты Енисея. В этой части ширина залива значительно сужается [6, 16].

Такая конфигурация и размеры залива играют ключевую роль в формировании его гидрологического и ветро-волнового режимов. Значительная протяженность и ширина северной части обеспечивают большие разгоны для волн, генерируемых ветрами северных румбов, приходящими из Карского моря.



Рисунок 1 Географическое расположение Енисейского залива

1.1.2. Расположение и морфометрия бухты Север

Район, детально рассматриваемый в дипломной работе, – бухта Север – является характерным примером малых заливных форм восточного побережья. Она расположена на Таймырском берегу, примерно в 120 км к югу от входного мыса Ефремов Камень. Координаты условного центра входа в бухту определены как 73°10' с.ш., 80°23' в.д. (73.165837° N, 80.384530° E) [17].

Бухта представляет собой небольшой, но хорошо выраженный в рельефе залив, вдающийся в берег на несколько километров. Вход в бухту ориентирован на северо-запад, что делает ее открытой для преобладающих в летний период северо-западных ветров и соответствующего им волнения, идущего с основной, наиболее широкой акватории Енисейского залива. Морфометрия самой бухты – ширина входа, глубина вдавания в сушу и очертания береговой линии – выступает важнейшим локальным фактором трансформации волновой энергии. Берега бухты сложены коренными породами, покрытыми слоем рыхлых четвертичных отложений, и подвержены активным криогенным процессам.

1.1.3. Геолого-геоморфологическое строение и рельеф побережья

Орография восточного побережья Енисейского залива кардинально отличается от западного и напрямую связана с его геологическим строением. Побережье является частью Таймырской складчатой области, а его рельеф сформирован северными отрогами горной системы Бырранга – древних гор герцинского возраста, испытавших в дальнейшем альпийские тектонические подвижки [5].

Ключевую роль в формировании современного облика побережья сыграли плейстоценовые оледенения и последующая голоценовая трансгрессия Мирового океана. Ледники, спускаясь с гор Бырранга, выпахали глубокие долины и троговые впадины. Последующее повышение

уровня моря привело к затоплению этих долин, в результате чего образовалось характерное для региона риасовое или фьордово-шхерное побережье с большим количеством заливов, бухт (включая бухту Север) и островов [4].

Следы этих процессов хорошо видны в современном рельефе:

Высокие, скалистые берега: Побережье носит преимущественно абразионно-бухтовый характер, где высокие и обрывистые участки (клифы) чередуются с заливами.

Морские террасы: Вдоль всего побережья четко прослеживаются ступенчатые поверхности – древние береговые линии, оставшиеся после неравномерного поднятия суши и отступления моря. Высота этих террас может достигать 100–120 метров над современным уровнем моря, что свидетельствует о значительных вертикальных движениях земной коры в недавнем геологическом прошлом.

Изрезанность береговой линии: Сложная форма побережья с многочисленными мысами и заливами создает мозаичную картину ветро-волновых условий, где на небольшом расстоянии друг от друга могут существовать участки, подверженные сильному волнению, и полностью закрытые, защищенные акватории.

1.1.4. Морфометрические характеристики и изрезанность береговой линии

Помимо общего геологического строения, для анализа ветро-волновых условий первостепенное значение имеют количественные морфометрические характеристики береговой линии. Эти параметры определяют, как энергия ветра передается водному столбу и как трансформируются уже сформированные волны при подходе к берегу [5].

Восточное побережье Енисейского залива характеризуется сложными морфометрическими показателями.

Степень изрезанности. Ключевой характеристикой является коэффициент изрезанности береговой линии, представляющий собой отношение ее фактической длины к длине прямой линии, соединяющей крайние точки участка. Для восточного побережья залива этот коэффициент значительно выше, чем для западного. Высокая степень изрезанности приводит к формированию множества полузамкнутых акваторий, заливов и бухт разного масштаба. Это создает крайне неоднородное поле ветрового волнения: на открытых участках, выступающих в залив мысах, волны достигают максимальных размеров, тогда как в глубине узких заливов они могут практически отсутствовать [4].

Экспозиция и ориентация берега. Важнейшим фактором является ориентация отрезков береговой линии и входов в бухты по отношению к доминирующим направлениям ветра. Генеральное направление восточного берега Енисейского залива — субмеридиональное (с севера на юг с некоторыми отклонениями). Однако многочисленные заливы, включая бухту Север, имеют входы, ориентированные на запад и северо-запад. Это делает их уязвимыми для волн, разгоняющихся на максимальной ширине Енисейского залива при прохождении циклонов и соответствующих им сильных ветрах западных румбов [8].

Экранирующий эффект. Наличие многочисленных островов, полуостровов и мысов создает так называемый экранирующий эффект. Каждый такой элемент орографии является естественным волноломом, за которым образуется зона «волновой тени» — область со значительно меньшей высотой волн. При движении вдоль такого побережья судно будет постоянно пересекать зоны с резко отличающимися волновыми условиями, что требует детального знания локальной батиметрии и морфометрии для обеспечения безопасности навигации.

Вследствие этого, сложная морфометрия восточного побережья обуславливает мозаичность ветро-волновых полей, что не позволяет использовать осредненные характеристики для всего района и требует проведения локальных, детальных анализов для каждой практически значимой акватории, такой как вход в бухту Север.

1.1.5. Ландшафты и растительный покров

Согласно ландшафтному районированию, территория относится к подзоне арктических тундр. Растительный покров сильно разрежен и представлен наиболее устойчивыми к суровым условиям видами. На плоских, дренированных участках террас и водоразделах доминируют мохово-лишайниковые сообщества с вкраплениями цветковых растений – полярного мака, дриады, некоторых видов камнеломок. В более защищенных от ветра долинах ручьев и по склонам южной экспозиции можно встретить низкорослые кустарнички – карликовую березку (ерник) и полярные ивы, которые не поднимаются выше 20–30 см над землей, прижимаясь к поверхности, чтобы пережить сильные зимние ветры и метели.

Бедность флоры и ее низкорослость обусловлены комплексом факторов: коротким (1,5–2 месяца) и холодным вегетационным периодом, низкими температурами почв, их бедностью и постоянным движением грунта из-за криогенных процессов.

1.2. Особенности рельефа дна Енисейского залива

Рельеф дна Енисейского залива имеет сложное строение и во многом унаследован от древней речной долины, затопленной в результате послеледниковой трансгрессии моря. Батиметрия залива характеризуется

относительно небольшими глубинами, которые в среднем составляют 6–20 м [6, 8].

Основной морфологической особенностью дна является подводный желоб – продолжение русла Енисея. Этот желоб, известный как Енисейская подводная долина, тянется вдоль всего залива, смещаясь к его восточному, правому берегу. Глубины в пределах желоба достигают 20–30 м, а в отдельных локальных понижениях могут быть и больше [4]. К западу от желоба располагается обширное мелководье с глубинами менее 10 м, занимающее большую часть акватории залива.

Наличие подводного желоба играет колоссальную роль в формировании гидрологической структуры. По нему происходит основной сток пресных речных вод в море, а также проникновение соленых морских вод в южную часть залива в придонном слое [9, 14]. Это создает условия для формирования устойчивой вертикальной стратификации водной толщи.

Рельеф дна в прибрежной зоне, особенно у изрезанного восточного берега, отличается большой неоднородностью. Здесь встречаются многочисленные подводные скалы, банки, каменистые гряды и отмели [4]. Непосредственно на входе в бухту Север рельеф дна также сложен. Детальные промеры глубин показывают наличие локальных понижений и поднятий, которые оказывают существенное влияние на трансформацию ветровых волн, подходящих из открытой части залива. При подходе к бухте волны испытывают рефракцию и дифракцию на неоднородностях дна, что приводит к изменению их высоты и направления распространения. Мелководье на подступах к бухте вызывает увеличение крутизны волн и их обрушение при штормовых условиях.

1.3. Климатические и метеорологические условия

Климат района Енисейского залива является арктическим морским, что определяется его высокоширотным положением, влиянием Северного Ледовитого океана и мощным выносом холодных воздушных масс с Сибирского антициклона в зимний период [4, 12]. Ближайший репрезентативный пункт с длинным рядом метеорологических наблюдений – полярная станция Диксон, расположенная на входе в залив [18].

Зима продолжительная (с октября по май), суровая и ветреная. Среднемесячная температура воздуха в январе-феврале составляет от -25°C до -28°C , при этом минимальные температуры могут опускаться ниже -45°C . В этот период преобладает антициклональный тип погоды, характеризующийся ясным небом, низкими температурами и слабыми ветрами. Однако часты прохождения атлантических циклонов, которые приносят с собой потепление, обильные снегопады, усиление ветра и метели. Скорость ветра в порывах может достигать 30–40 м/с, что создает крайне неблагоприятные условия для любой деятельности. Устойчивый снежный покров образуется в конце сентября – начале октября и сходит в середине июня [4, 18].

Лето короткое, холодное и пасмурное. Безморозный период очень короткий, его средняя продолжительность не превышает 70-80 дней. Среднемесячная температура самого теплого месяца, июля, составляет около $+5^{\circ}\text{C} \dots +7^{\circ}\text{C}$ [18]. Даже в летние месяцы возможны заморозки и выпадение снега. В течение летнего сезона преобладает циклоническая деятельность, что обуславливает пасмурную погоду с частыми осадками в виде дождя и мороси.

Период, рассматриваемый в данной дипломной работе (май-октябрь 2020 года), охватывает конец весны, лето и начало осени.

Май является переходным месяцем. Температуры еще отрицательные (в среднем -7°C), но наблюдается их устойчивый рост [19]. Начинается процесс таяния снежного покрова на суше.

Июнь, июль и август – летние месяцы. Происходит вскрытие залива ото льда. Устанавливаются положительные среднесуточные температуры. Это период наиболее активной навигации [20].

Сентябрь – первый осенний месяц. Температура воздуха быстро понижается, в конце месяца переходя через 0°C к отрицательным значениям. Увеличивается число штормовых ветров.

Октябрь – начало зимы. Устанавливаются устойчивые отрицательные температуры, начинается ледообразование на акватории залива [2].

Ветровой режим является ключевым фактором, определяющим как ледовые, так и волновые условия. В годовом ходе преобладают ветры южных и юго-западных направлений, что связано с общей циркуляцией атмосферы в данном регионе. Однако в летний период (июнь-август) возрастает повторяемость ветров северных румбов (северных, северо-восточных), что связано с прогревом материка и установлением области пониженного давления над ним. Среднегодовая скорость ветра составляет 6–8 м/с, что является одним из самых высоких показателей для побережья России. Повторяемость штормовых ветров (со скоростью более 15 м/с) велика, особенно в осенне-зимний период [4, 18].

1.4. Гидрологический режим

Гидрологический режим Енисейского залива формируется под влиянием трех основных факторов: стока реки Енисей, водообмена с Карским морем и сезонных климатических изменений [9].

Речной сток. Енисей – одна из величайших рек планеты, занимающая седьмое место в мире по длине и одно из первых по водности в России. Среднегодовой сток Енисея оценивается примерно в 620-630 км³, что составляет значительную часть пресноводного стока в Карское море [21, 22]. Сток крайне неравномерен в течение года. Около 70% годового стока приходится на короткий период весенне-летнего половодья (май-июль). В это время огромные массы теплых и пресных вод поступают в залив, вызывая быстрое разрушение припайного льда, резкое повышение уровня и формирование мощного стокового течения, направленного на север [6, 7]. В период половодья граница пресных вод смещается далеко на север, достигая входных мысов залива, а иногда и выходя за его пределы в Карское море.

Водообмен с Карским морем. Карское море, в свою очередь, оказывает постоянное влияние на гидрологию залива. С севера в залив поступают холодные и соленые арктические воды [5]. Взаимодействие речных и морских вод приводит к формированию сложной гидрологической структуры. Образуется так называемый «эстуарный клин» или фронтальная зона, где происходит активное смешение вод разной плотности [14]. Летом, в период максимального стока, этот клин вытесняется далеко на север. Зимой, когда речной сток минимален, соленые морские воды по придонному слою проникают далеко на юг, иногда доходя до Бреховских островов [9].

Температура и соленость. Температурный режим и соленость вод Енисейского залива имеют ярко выраженную сезонную и пространственную изменчивость [14]. Зимой вся акватория покрыта льдом, и температура воды близка к точке замерзания (около -1.5°C...-1.8°C в зависимости от солености). Соленость в этот период максимальна, так как речной сток минимален, а осолонение происходит в процессе льдообразования [4]. Летом поверхностные воды прогреваются до

+5°C...+10°C в южной части и до +2°C...+4°C в северной [6]. Соленость на поверхности резко падает из-за мощного притока пресных вод, составляя от 1-3 ‰ на юге до 15-20 ‰ на севере. Вертикальная структура характеризуется резким скачком температуры (термоклин) и солености (галоклин) на границе между поверхностным опресненным слоем и придонными солеными водами.

Приливы и течения. Течения в Енисейском заливе имеют сложную природу и складываются из стоковой, приливно-отливной и ветровой составляющих.

Стоковое течение является доминирующим, особенно в летний период. Оно направлено генерально на север, вдоль оси залива, и его скорость в период половодья может достигать 100–150 см/с (2–3 узла) [4, 6].

Приливно-отливные течения носят полусуточный характер. Приливные явления проникают в залив из Карского моря. Величина прилива невелика и составляет в среднем 0.4–0.8 м. Скорости приливных течений обычно не превышают 20–30 см/с, но в узкостях они могут быть выше [4].

Ветровые течения (дрейфовые и сгонно-нагонные) играют важную роль, особенно при сильных и продолжительных ветрах. Штормовые ветры южных направлений усиливают стоковое течение и вызывают понижение уровня у северных берегов (сгон). Ветры северных румбов, наоборот, тормозят сток и вызывают подъем уровня (нагон), который может достигать 1-1.5 м [7].

Суммарное поле течений определяет перенос водных масс, льда и наносов, а также влияет на условия навигации [3] и формирование волнового режима.

1.5. Основные синоптические процессы и ветровой режим

Ветровой режим в районе Енисейского залива, как и во всей западной части Российской Арктики, является прямым следствием крупномасштабной атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой и Евразией. Характер и повторяемость ветров определяются сезонной сменой доминирующих барических систем: траекториями движения атлантических циклонов и положением и интенсивностью Сибирского антициклона [4]. Понимание этих синоптических процессов является ключом к интерпретации данных о ветре и, как следствие, о волнении.

1.5.1. Зимний период (октябрь – апрель)

В холодный период года погоду в регионе в среднем определяет западная периферия Сибирского (Азиатского) антициклона — мощной и устойчивой области высокого давления, формирующейся над сильно выхоленной поверхностью континента. Такое положение в общей барической схеме обуславливает преобладание устойчивых ветров южного и юго-западного направлений, которые несут холодный континентальный воздух с суши на акваторию Карского моря [25].

Однако эта усредненная картина часто нарушается интенсивной циклонической деятельностью. Современные исследования показывают, что в последние десятилетия наблюдается тенденция к увеличению частоты и интенсивности зимних циклонов, проникающих в Карское море с Северной Атлантики [25]. Прохождение такого циклона вызывает резкую смену погоды: ветер меняет направление на западное, северо-западное и северное, его скорость резко возрастает до штормовой, наблюдаются потепление, интенсивные снегопады и метели. Таким образом, зимний режим представляет собой чередование периодов стабильной антициклональной погоды с южными ветрами и резких, но мощных циклонических вторжений с запада и севера.

1.5.2. Летний период (июнь – август)

С наступлением лета синоптическая обстановка кардинально меняется. Сибирский антициклон полностью разрушается. Материк Евразии быстро прогревается, и над ним формируется обширная область пониженного давления. В результате барическое поле перестраивается, и преобладающим становится перенос воздушных масс с относительно холодного Северного Ледовитого океана на нагретый материк. Это приводит к доминированию в летние месяцы ветров северного, северо-западного и северо-восточного направлений.

Эти ветры приносят на побережье прохладную, влажную и пасмурную погоду. Исследования циклонической деятельности показывают, что летние циклоны, смещающиеся над акваторией Карского моря, играют ключевую роль в поддержании этого режима [25]. Именно ветры северных направлений, связанные с прохождением этих циклонов, имеют максимальные разгоны над свободной ото льда акваторией Карского моря и самого Енисейского залива. Поэтому самые высокие и опасные волны в навигационный период генерируются именно при таких синоптических ситуациях [13].

1.5.3. Переходные сезоны (май, сентябрь – начало октября)

Весенний и осенний периоды характеризуются максимальной синоптической активностью и наибольшей изменчивостью погодных условий. В это время происходит сезонная перестройка атмосферной циркуляции с зимнего типа на летний и обратно. Наблюдения подтверждают, что именно на эти месяцы, особенно на осень, приходится годовой максимум повторяемости глубоких и быстро смещающихся циклонов [25].

Активность циклогенеза в переходные сезоны обусловлена обострением температурных контрастов на арктическом фронте — границе

между холодными арктическими воздушными массами и более теплыми массами умеренных широт. Это приводит к тому, что в сентябре и октябре наблюдается наибольшая повторяемость штормовых ветров. Ветры в эти месяцы могут иметь любое направление и быстро менять свою силу, что создает наиболее сложные и опасные условия для навигации и проведения морских операций [4, 25].

1.6. Ветро-волновые условия

Ветровое волнение в Енисейском заливе, как и в любом полузамкнутом водоеме, имеет свои особенности по сравнению с открытым морем. Параметры волн (высота, период) зависят от скорости, направления и продолжительности ветра, а также от размеров свободной ото льда акватории, которая выступает в качестве разгона для волн [13].

Сезонная изменчивость. Волновой режим тесно связан с ледовым. Зимой, когда залив покрыт сплошным льдом, ветровое волнение отсутствует. Волновая активность начинается после вскрытия акватории и достигает своего максимума в осенний период (сентябрь-октябрь), когда ледовые условия еще позволяют развиваться волнению, а ветровая деятельность значительно усиливается [4]. В этот период наблюдаются самые сильные шторма.

Пространственная изменчивость. Размеры волн существенно различаются в разных частях залива. Наибольшие высоты волн наблюдаются в северной, открытой части, где разгоны максимальны. При ветрах северных направлений волны, зародившиеся в Карском море, могут беспрепятственно проникать в залив, достигая высоты 3-4 м, а в редких случаях и более [13]. По мере продвижения на юг размеры волн уменьшаются из-за сокращения разгонов и трения о дно на мелководьях.

Ветры южных направлений также способны генерировать значительное волнение. Несмотря на ограниченные разгоны в пределах самого залива, устойчивые и сильные южные ветры могут приводить к развитию волн высотой до 2-2.5 м в центральной и северной частях акватории [4].

Локальные особенности. Рассматриваемая бухта Север, как и другие заливы восточного побережья, имеет сложный волновой режим. При ветрах западных и северо-западных направлений, дующих с открытой части Енисейского залива, на входе в бухту могут наблюдаться наиболее высокие волны. Однако изрезанность береговой линии и наличие островов и мысов приводят к тому, что волнение внутри самой бухты значительно слабее, чем на подходах к ней. Происходит трансформация волн за счет рефракции, дифракции и частичного обрушения. При ветрах восточных направлений бухта находится в ветровой тени, и волнение в ней минимально.

Вследствие этого, для безопасной навигации и проведения работ на акватории бухты Север необходимо точное понимание того, как волны, генерируемые в открытой части Енисейского залива, трансформируются при подходе к бухте и на ее входе. Именно анализу этого процесса и посвящена данная дипломная работа.

ГЛАВА 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для детального анализа формирования ветро-волнового режима ключевым инструментом выступил метод численного моделирования. Применение численных моделей дает возможность провести так называемый «вычислительный эксперимент», в рамках которого можно не только восстановить гидродинамическую обстановку за прошедший период, но и оценить вклад ветра в формирование течений и общей динамики вод. В качестве основного инструмента был выбран программный комплекс Delft3D, являющийся одним из мировых лидеров в области моделирования водных систем.

2.1. Описание численной модели Delft3D

Программный комплекс Delft3D представляет собой интегрированную систему модулей для численного моделирования, разработанную и поддерживаемую ведущим голландским научным институтом Deltares [27].

Основой модели является решение системы дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных разностей на структурированной сетке. Комплекс позволяет использовать как простые прямоугольные (декартовы) сетки, так и более сложные криволинейные, ортогональные сетки, которые дают возможность детально описывать сложные очертания береговой линии, такие как извилистые русла рек, заливы и портовые акватории. Это особенно важно для таких объектов, как Енисейский залив с его изрезанным восточным побережьем.

Область применения Delft3D чрезвычайно широка и напрямую касается задач ветро-волнового моделирования. Она охватывает решение следующих задач:

Гидродинамическое моделирование: Расчет течений и уровней воды в прибрежных зонах, возникающих под действием ветра, плотностных эффектов и волнового воздействия.

Прогнозирование ветрового волнения: Оценка параметров волн, их трансформации при подходе к берегу и взаимодействия с течениями.

Анализ переноса веществ: Моделирование распространения солености и температуры, которые влияют на вертикальную структуру водной толщи и, следовательно, на профиль ветрового течения.

Морфодинамическое моделирование: Долгосрочные прогнозы размыва и аккумуляции донных отложений под действием волн и течений [26].

2.1.1. Расчетные модули и ключевая роль Delft3D-FLOW

Модульная архитектура Delft3D является одним из ключевых преимуществ комплекса. Она позволяет исследователю, подобно конструктору, собирать расчетную схему, включая в нее только те процессы, которые необходимы для решения конкретной задачи. Это обеспечивает высокую вычислительную эффективность. Основными модулями системы являются [27]:

Delft3D-WAVE: Модуль для расчета генерации ветровых волн под действием ветра, их распространения и диссипации. Как правило, в его основе лежит хорошо зарекомендовавшая себя сторонняя модель SWAN (Simulating WAVes Nearshore), которая рассчитывает основные параметры волнения: значительную высоту волн, средний и пиковый периоды, направление распространения.

Delft3D-WAQ: Модуль для моделирования качества воды. Он использует поля течений, рассчитанные в гидродинамическом блоке, для моделирования переноса и трансформации различных веществ: растворенного кислорода, биогенов (азот, фосфор, кремний), фитопланктона, загрязнителей.

Delft3D-MOR: Модуль для расчета переноса донных и взвешенных наносов и последующих изменений рельефа дна. Он рассчитывает эрозию, транспорт и аккумуляцию осадков под действием течений и волн, позволяя моделировать эволюцию морфологии на временных масштабах от одного шторма до десятилетий.

Delft3D-ECO: Модуль для моделирования развития простых экосистем, например, популяций фитопланктона или зарослей макрофитов, в зависимости от гидрологических условий и доступности питательных веществ.

Центральным и основополагающим элементом всей системы является гидродинамический модуль Delft3D-FLOW. В контексте ветро-волновых исследований его роль заключается в расчете ветровых течений, которые неразрывно связаны с волнением и влияют на его параметры. Таким образом, модуль можно считать «сердцем» всего комплекса, так как именно он рассчитывает поля скоростей течений и уровней воды, которые являются движущей силой для всех остальных процессов [26].

С математической точки зрения, Delft3D-FLOW решает трехмерные уравнения Рейнольдса для осредненных скоростей течения (RANS), основанные на фундаментальных законах сохранения массы и импульса (уравнениях Навье-Стокса):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \quad (2.1)$$

$$-fv = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} + F_{\xi} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} +$$

$$+ fu = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \quad (2.2)$$

Где u — горизонтальная составляющая скорости в направлении ξ , v — горизонтальная составляющая скорости в направлении η , w — вертикальная составляющая скорости в σ -координате, ζ — возмущение свободной поверхности, d — глубина покоящегося моря (от среднего уровня до дна), σ — вертикальная σ -координата (0 — поверхность, -1 — дно), ρ_0 — средняя плотность воды, f — параметр Кориолиса, P_ξ, P_η — градиенты давления в направлениях ξ и η , ν_v — вертикальная турбулентная вязкость

Уравнения, приведённые выше, описывают движение водных масс в трансформированной (криволинейной и вертикально- σ) системе координат, используемой в численных гидродинамических моделях. Левая часть уравнений содержит производные от компонентов скорости u и v по времени и пространственным координатам ξ , η и σ , что отражает процессы адвекции, а также влияние кривизны координатной сетки через метрические коэффициенты $\sqrt{G_{\xi\xi}}$, $\sqrt{G_{\eta\eta}}$, $\sqrt{G_{zz}}$. Правая часть уравнений включает силу Кориолиса (fff), горизонтальные градиенты давления, объёмные силы (например, турбулентное трение) и вертикальную турбулентную диффузию, представленную через вертикальную вязкость ν_v . Эти уравнения обеспечивают математическую основу для моделирования метеорологических и гидрологических процессов в прибрежных и открытых районах моря.

Модуль Delft3D-FLOW учитывает все основные силы, формирующие динамику вод в рамках ветрового воздействия: ветровое напряжение на свободной поверхности (основная движущая сила).

2.1.1.1. Характеристика ветрового режима в районе исследования

В задачах, связанных с формированием ветровых течений и волнения, основным источником энергии, поступающей в акваторию, является касательное напряжение ветра на ее поверхности.

Качество результатов численного моделирования напрямую зависит от точности и детальности задания ветрового поля [28].

В данной работе был проведен анализ ветрового режима на входе в бухту Север за безледовый период мая-октября 2020 года.

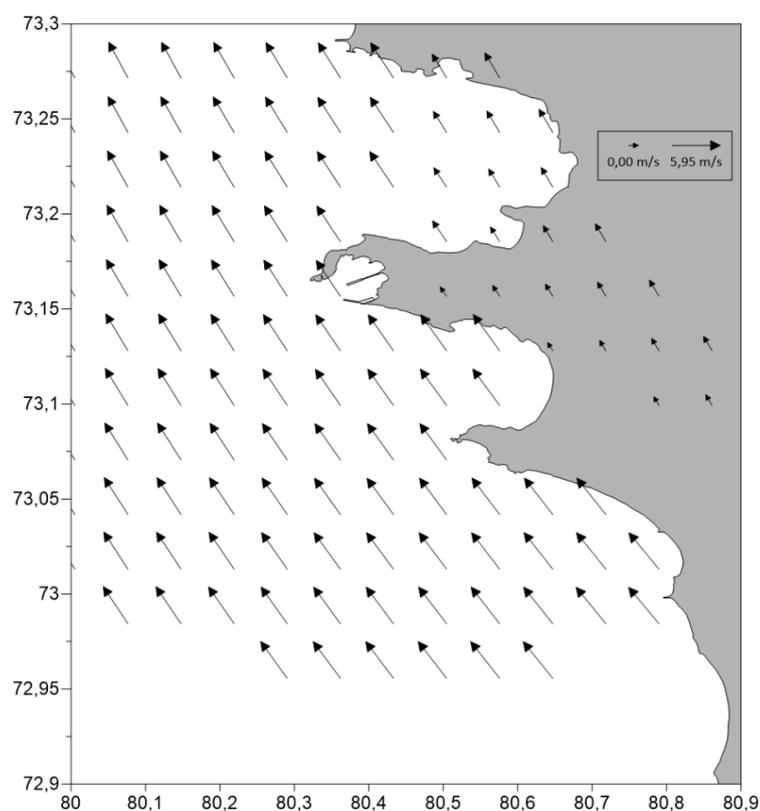


Рисунок 2 Распределение поля ветра в районе бухты Север Енисейского залива 15.05.2020 в 00:00

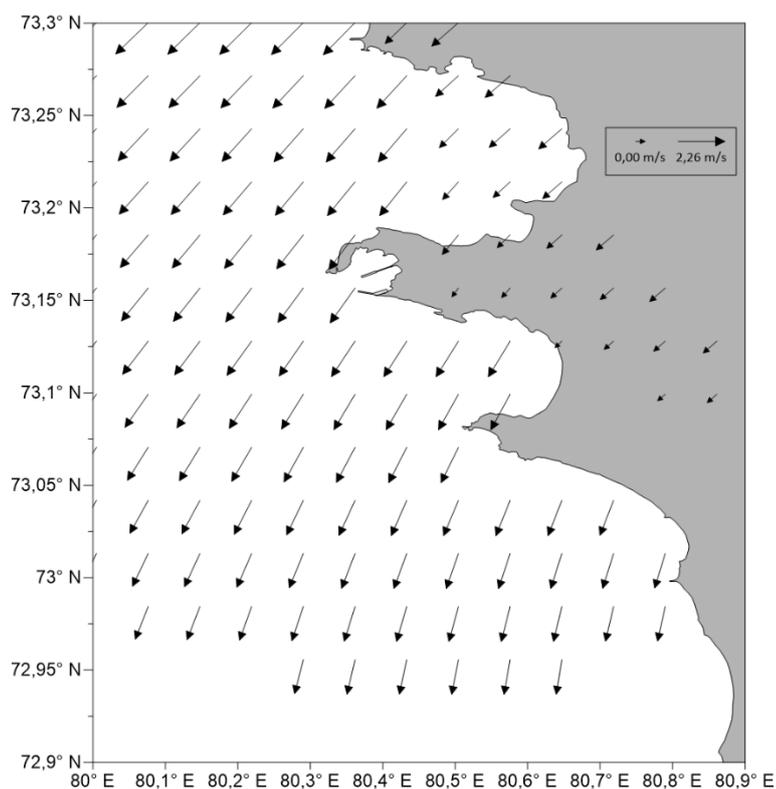


Рисунок 3 Распределение поля ветра в районе бухты Север Енисейского залива 15.06.2020 в 00:00

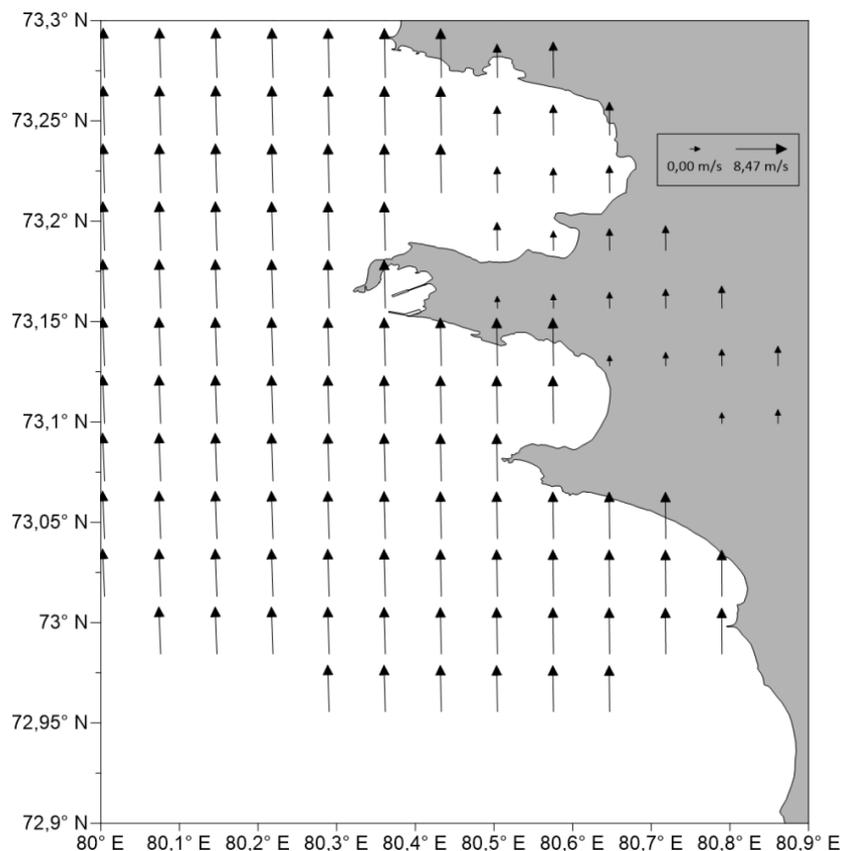


Рисунок 4 Распределение поля ветра в районе бухты Север Енисейского залива 15.07.2020 в 00:00

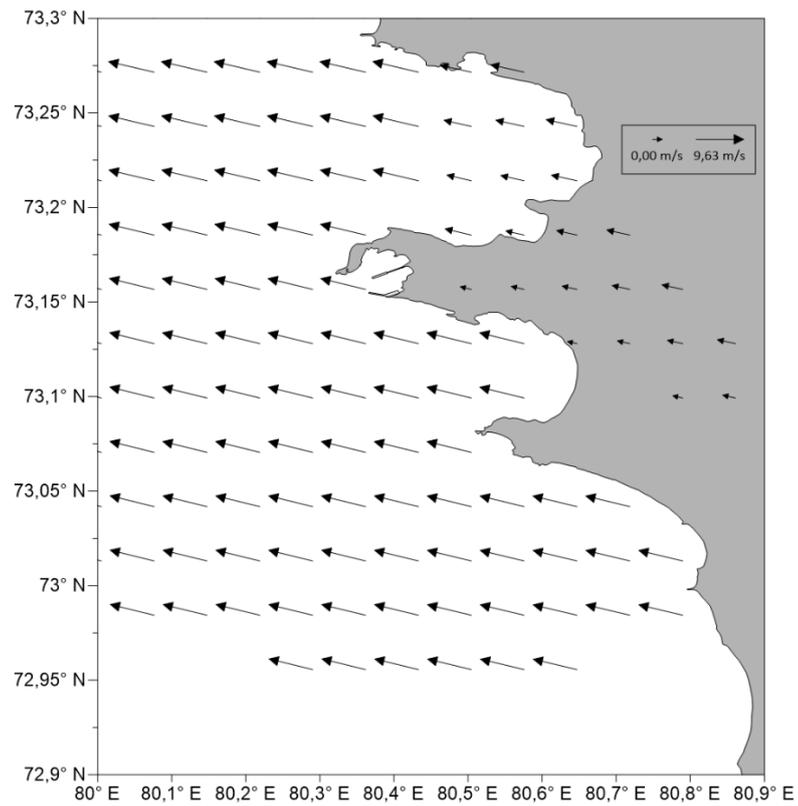


Рисунок 5 Распределение поля ветра в районе бухты Север Енисейского залива
15.08.2020 в 00:00

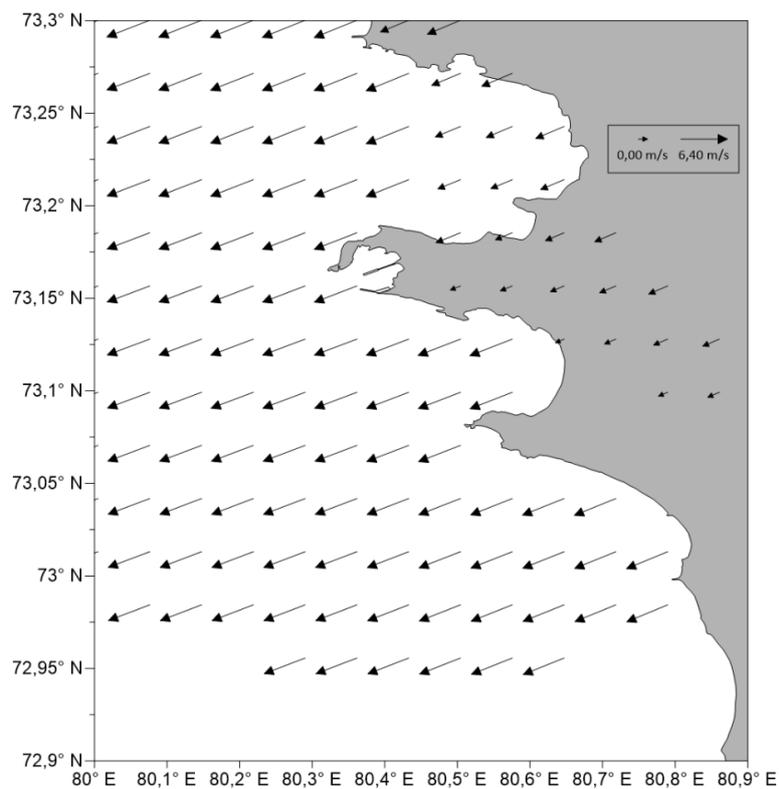


Рисунок 6 Распределение поля ветра в районе бухты Север
Енисейского залива 15.09.2020 в 00:00

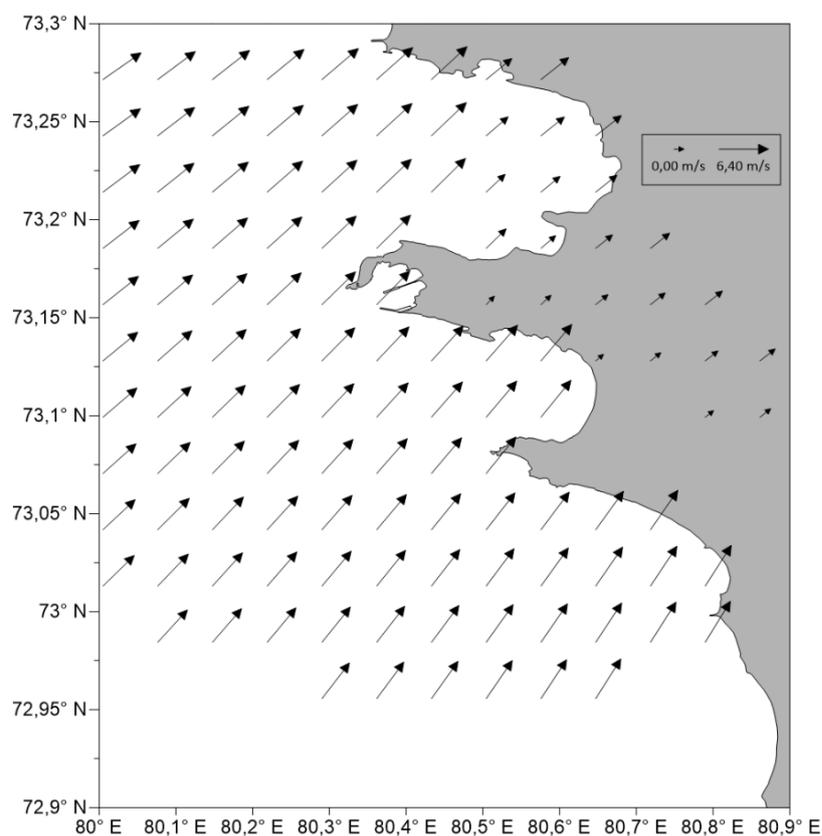


Рисунок 7 Распределение поля ветра в районе бухты Север Енисейского залива 15.10.2020 в 00:00

Анализ временного ряда данных о скорости и направлении ветра, полученных для района бухты Север, выявил выраженную сезонную изменчивость ветрового режима в период с 15 мая по 15 октября 2020 года. Эта изменчивость напрямую определяет динамику формирования ветро-волновых условий на акватории.

Период максимальной ветровой активности пришелся на середину лета. В июле и августе средние скорости ветра достигали пиковых значений за весь период наблюдений, составляя 8.47 м/с и 9.63 м/с соответственно. Такие условия способствовали генерации наиболее интенсивного, сильного и очень сильного волнения. Умеренная ветровая обстановка наблюдалась в конце весны и начале осени: в мае средняя скорость ветра составляла около 5.95 м/с, а в сентябре, после прохождения летнего максимума, снизилась до 6.40 м/с. Наиболее спокойные условия

зафиксированы в июне, когда средняя скорость ветра не превышала 2.26 м/с. К середине октября, с началом процессов ледообразования на акватории залива, ветровая активность заметно ослабла, и средние скорости упали до 3–4 м/с.

Анализ повторяемости направлений показал устойчивое доминирование ветров северного и северо-восточного секторов в течение большей части безледового периода. Это обеспечивало стабильное распространение волн в южном и юго-западном направлениях, вглубь Енисейского залива. Исключение составил июнь, в котором преобладали ветры южных и юго-западных компонент, что соответствует периоду наименьшей ветровой активности. Наибольшая стабильность векторов ветра, свидетельствующая о преобладании устойчивых барических систем, была отмечена в пиковые месяцы — июле и августе.

2.1.2. Модуль расчета волнения Delft3D-WAVE и модель SWAN

Помимо расчета течений, программный комплекс Delft3D обладает мощным функционалом для анализа ветрового волнения, который реализован в модуле Delft3D-WAVE. Этот модуль служит интерфейсом для подключения и совместной работы с одной из наиболее авторитетных и широко используемых в мире моделей волнения — SWAN (Simulating WAVes Nearshore) [27]. Такое сопряжение позволяет проводить комплексные расчеты, учитывающие взаимное влияние течений и волн, что особенно важно для эстуарных и прибрежных зон.

Основная задача модуля Delft3D-WAVE — управлять взаимодействием между гидродинамическим ядром (Delft3D-FLOW) и волновым блоком (SWAN). Delft3D-FLOW передает в SWAN информацию о полях глубин (батиметрию), уровнях воды и скоростях течений на каждый момент времени. В свою очередь, SWAN рассчитывает поле

волнения и может передавать обратно в FLOW так называемые радиационные напряжения — дополнительные силы, возникающие из-за волн и влияющие на средний уровень воды и течения. Для анализа ветро-волновых условий в настоящей работе используется именно связка этих модулей, где основным генератором волн выступает заданное поле ветра.

Модель SWAN — это численная модель волнения третьего поколения, разработанная в Делфтском технологическом университете (Нидерланды). Статус «третьего поколения» означает, что модель основана на наиболее полных физических представлениях и не делает упрощающих предположений о форме волнового спектра, что позволяет с высокой точностью описывать сложные условия волнения в прибрежной зоне [29].

В основе модели лежит решение уравнения баланса плотности волнового действия. В отличие от отслеживания отдельных волн, модель оперирует понятием волнового спектра — функции, показывающей, как энергия волн распределена по разным частотам и направлениям. Уравнение баланса описывает изменение спектра волнового действия во времени и пространстве под влиянием различных физических процессов:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot [(\vec{C}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (2.3)$$

Где $\frac{\partial N}{\partial t}$ - Описывает изменение плотности действия волн (N) с течением времени, N — это спектральная плотность действия волн, которая связана с энергией волн и их распространением, ∇_x — градиент по горизонтальным координатам (x-координата), C_g — групповая скорость волн (скорость, с которой передается энергия волн), U — скорость течения, C_σ — коэффициент диссипации энергии волн, σ — вертикальная координата, c_θ — коэффициент, связанный с изменениями направления волн, θ — направление волн, S_{tot} — нетто-источник/сток энергии волн

Для мелкомасштабных условий спектральное уравнение баланса волнового действия (2.1.2.1) может быть выражено в декартовых или сферических координатах:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (2.4)$$

Общий источниковый член S_{tot} в модели SWAN представляет собой суперпозицию шести ключевых физических процессов, отвечающих за генерацию, трансформацию и диссипацию волновой энергии:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (2.5)$$

Где S_{in} – Это генерация волн ветром, S_{nl3} – трехволновая нелинейная дисперсия, S_{nl4} – четырехволновая нелинейная дисперсия, $S_{ds,w}$ – диссипация энергии волн из-за трения с водой, $S_{ds,b}$ – диссипация энергии волн из-за взаимодействия с дном, $S_{ds,br}$ – диссипация энергии волн из-за обрушения волн

Ниже указаны основные характеристики волн, определяемые с помощью модуля Delft3D-WAVE (SWAN), а также применённые в последующих вычислениях:

Значительная высота волн h_{sig} , м:

$$h_s = 4 \sqrt{\iint E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \quad (2.6)$$

Средняя длина волны λ (м):

$$\lambda = 2\pi \left[\frac{\iint k^p E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\iint k^{p-1} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

Где λ – средняя длина волны, k – волновое число, p — это показатель степени, который определяет, как учитывается спектр волнения при вычислении средней длины волны. Для средней длины волны обычно используется $p=2$,

$E(\sigma, \theta)$ — это спектральная плотность энергии волнения, σ — нормированная глубина, θ — направление распространения волн

Средний период волн, T_m (с):

$$T_m = 2\pi \left(\frac{\omega E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \right)^{-1} \quad (2.1.2.6)$$

$E(\omega, \theta)$ — это спектральная плотность энергии волнения, зависящая от:

ω — радиальной частоты,

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

θ — направления распространения волн.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ВЕТРО-ВОЛНОВОГО РЕЖИМА

Для детального анализа и воспроизведения ветро-волновых условий в районе бухты Север Енисейского залива была построена и настроена численная гидродинамическая модель. В данном разделе приводится описание ее ключевых исходных параметров, включая расчетную сетку и данные об атмосферном воздействии, которые использовались для проведения вычислительных экспериментов.

3.1. Исходные параметры модели

Численное моделирование гидродинамической обстановки проводилось с использованием программного комплекса Delft3D, функционал которого был подробно описан в предыдущей главе.

Основой для проведения численных экспериментов послужила специально построенная для района исследования криволинейная ортогональная расчетная сетка (рисунок 7). Выбор такого типа сетки обусловлен ее способностью с высокой точностью описывать сложные очертания береговой линии Енисейского залива и прилегающих бухт [27]. Для оптимизации вычислительных ресурсов и достижения максимальной детализации в ключевом районе, пространственный размер ячеек сетки был сделан переменным. Разрешение плавно изменялось от 2,0 км на внешних, открытых границах расчетной области в Карском море до 30 м непосредственно в акватории бухты Север. Такое сгущение сетки в районе исследования позволило с высокой точностью учесть особенности локального рельефа дна, включая подходы к бухте (рисунок 8).

В качестве основного динамического фактора, определяющего изменчивость течений и уровня моря, в модели использовалось атмосферное воздействие. Данные об атмосферных условиях (форсинги) были получены из глобального климатического реанализа пятого поколения ERA5 [30]. Проект ERA5, разработанный Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды, представляет собой численное описание недавней истории климата и является одним из наиболее качественных и полных источников метеорологической информации в мире.

Период исходных данных, использованных для моделирования, составил с 1 мая по 31 октября 2020 года, что полностью охватывает безледовый сезон и периоды его становления и разрушения. Пространственная дискретность полей атмосферных форсингов из базы ERA5 составляла $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Для расчетов были задействованы поля компонент скорости ветра на высоте 10 м (U_{10} , V_{10}) и атмосферного давления на уровне моря. Временной интервал этих данных составил 1 час, что позволяет с высокой точностью воспроизводить реакцию морской системы на прохождение синоптических возмущений, таких как циклоны.

Поскольку разрешение расчетной гидродинамической сетки значительно выше разрешения сетки реанализа, интерполяция полей атмосферных форсингов в каждый узел расчетной сетки выполнялась автоматически встроенными инструментами комплекса Delft3D непосредственно в процессе моделирования [27].

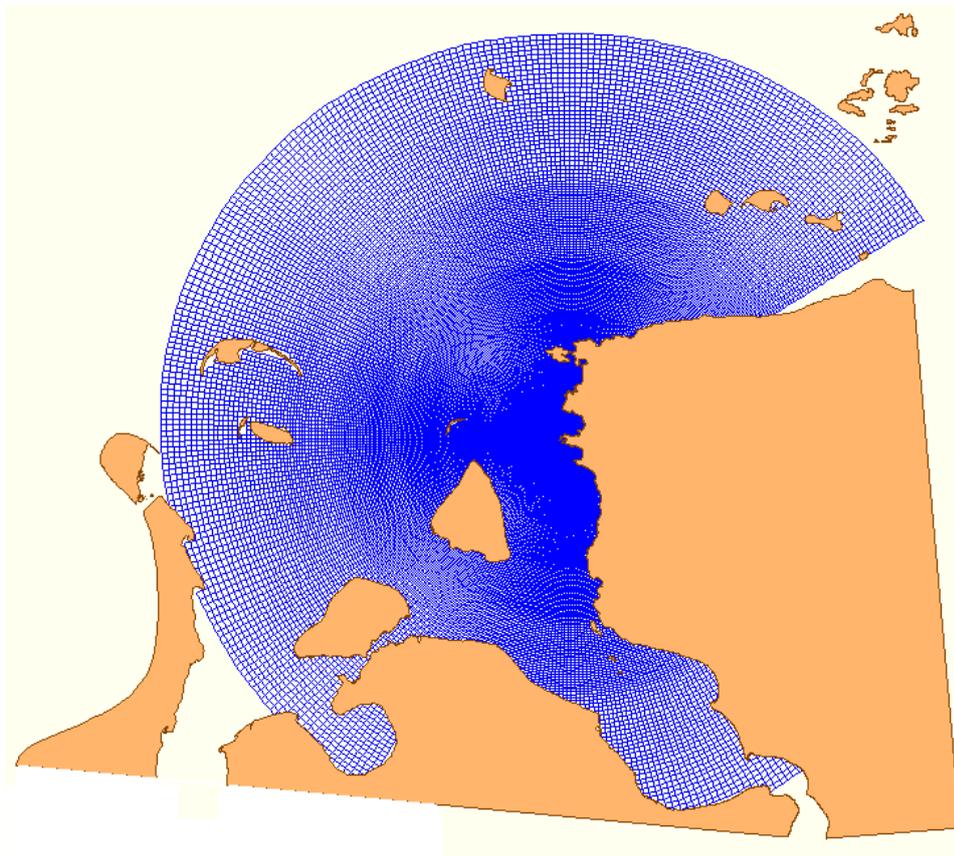


Рисунок 8 Расчетная сетка для моделирования колебаний уровня моря, параметров ветрового волнения течений в Енисейском заливе

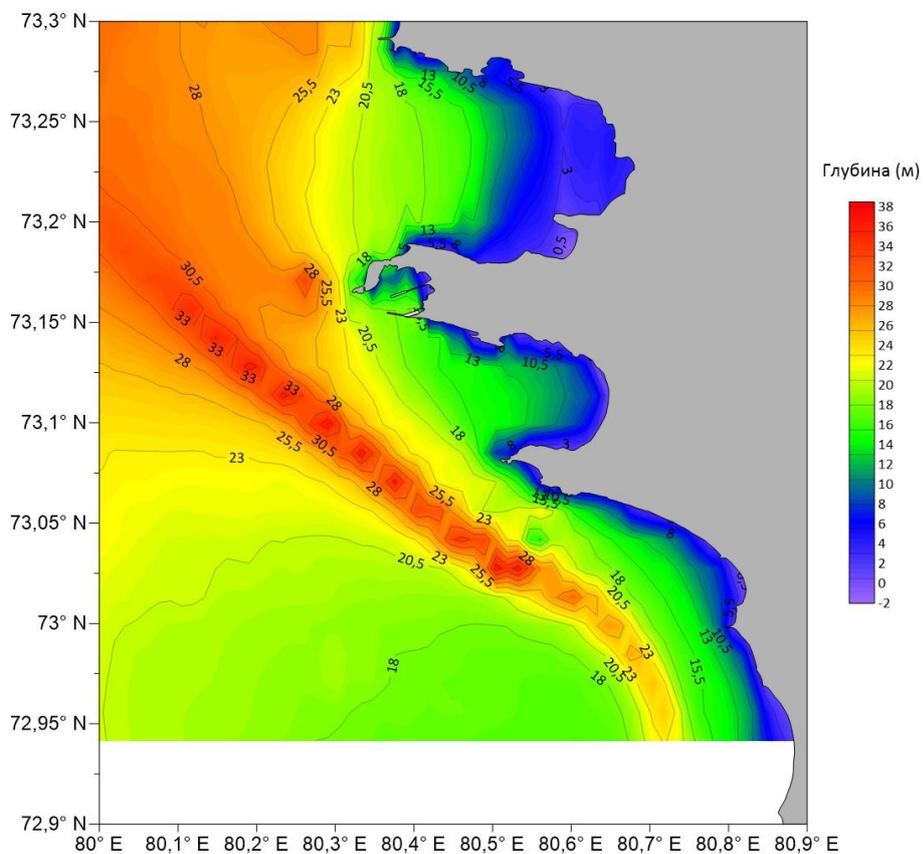


Рисунок 9 Батиметрия в районе бухты Север Енисейского залива

На представленном рисунке показана детальная карта батиметрии района исследования, охватывающего вход в бухту Север и прилегающую к ней акваторию восточной части Енисейского залива. Рельеф дна на данном участке отличается высокой сложностью и наличием нескольких ярко выраженных морфологических зон.

Основной чертой рельефа в западной части изображенной акватории (приблизительно к западу от 80.3° в.д.) является восточный склон Енисейского глубоководного желоба. Глубины здесь плавно, но уверенно увеличиваются в западном направлении, достигая 33 метров и более, что отмечено оранжевыми и красными цветами на карте. Этот желоб является ключевым элементом гидродинамики всего Енисейского залива.

Переход от глубоководного желоба к прибрежной платформе характеризуется зоной схождения изобат и, как следствие, значительной крутизной склона. Особенно это заметно в координатах 73.1° с.ш. 80.3° в.д., где на относительно коротком расстоянии глубина резко меняется с 28 до 20.5 метров.

К востоку от склона желоба располагается обширное прибрежное мелководье, или шельфовая платформа, с преобладающими глубинами от 13 до 23 метров (отмечены зеленым и салатным цветами). Рельеф этой платформы неоднороден, на что указывает извилистый характер изобат 18 м и 20.5 м.

Бухта Север, расположенная в районе 73.15° с.ш., представляет собой мелководный залив, врезаемый в береговую черту. Глубины на входе в бухту составляют порядка 13–18 метров, однако они стремительно уменьшаются по мере продвижения вглубь акватории. Внутри бухты глубины не превышают 4–6 метров (синие и фиолетовые цвета), а в вершине бухты отмечены изобатой 0.5 метра, что свидетельствует о наличии осушек.

В целом, рельеф дна в прибрежной зоне и непосредственно на подходах к бухте отличается высокой изрезанностью и наличием локальных понижений и поднятий. Такое сложное строение дна, с резкими перепадами глубин от глубоководного желоба к прибрежной платформе и наличием мелководий, оказывает определяющее влияние на процессы трансформации ветровых волн, вызывая их рефракцию, дифракцию и обрушение при подходе к берегу.

3.2. Анализ полей течений

На основе описанных в п. 3.1 исходных данных была смоделирована гидродинамическая обстановка в Енисейском заливе с акцентом на детальный анализ полей течений в районе бухты Север. Основной движущей силой в моделируемых процессах выступало ветровое поле за период с мая по октябрь 2020 года. В результате моделирования были получены пространственно-временные распределения скоростей и направлений течений, структура которых напрямую отражает изменчивость ветрового режима, проанализированного в главе 2. Характерные для каждого месяца схемы переноса водных масс в районе бухты Север представлены ниже.

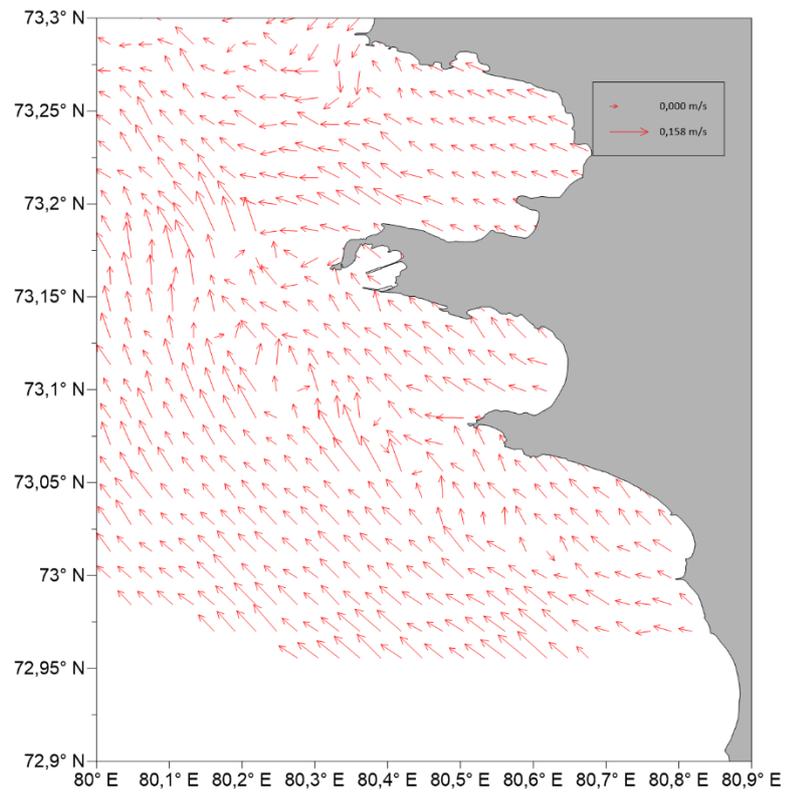


Рисунок 10 Распределение поля поверхностных течений в районе бухты Север Енисейского залива 15.05.2020 в 00:00

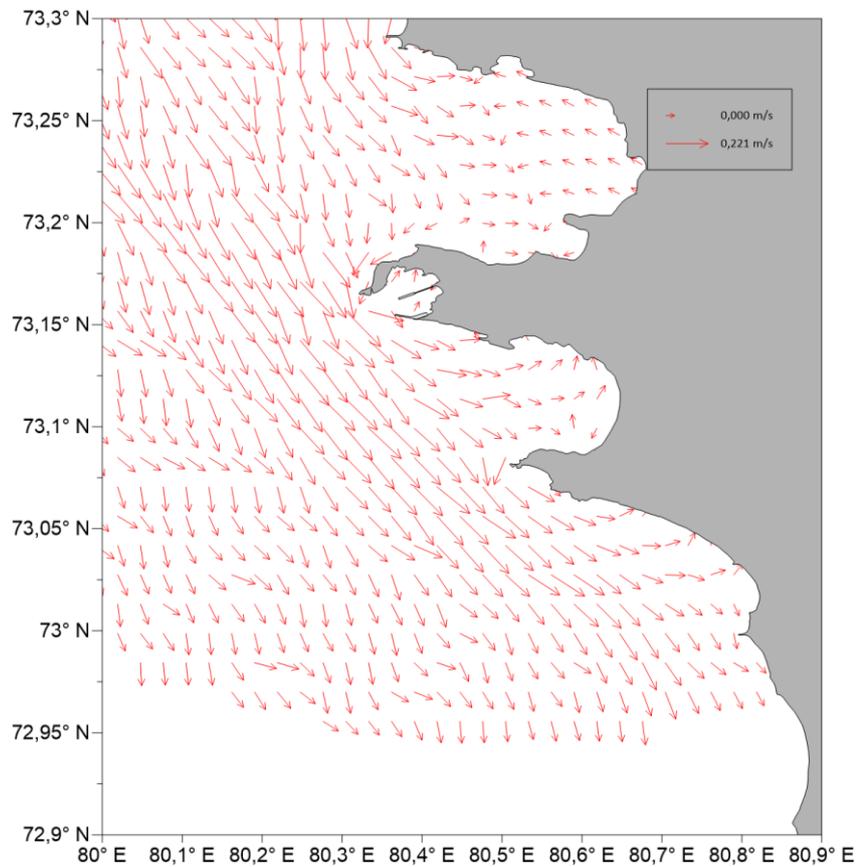


Рисунок 11 Распределение поля поверхностных течений в районе бухты Север Енисейского залива 15.06.2020 в 00:00

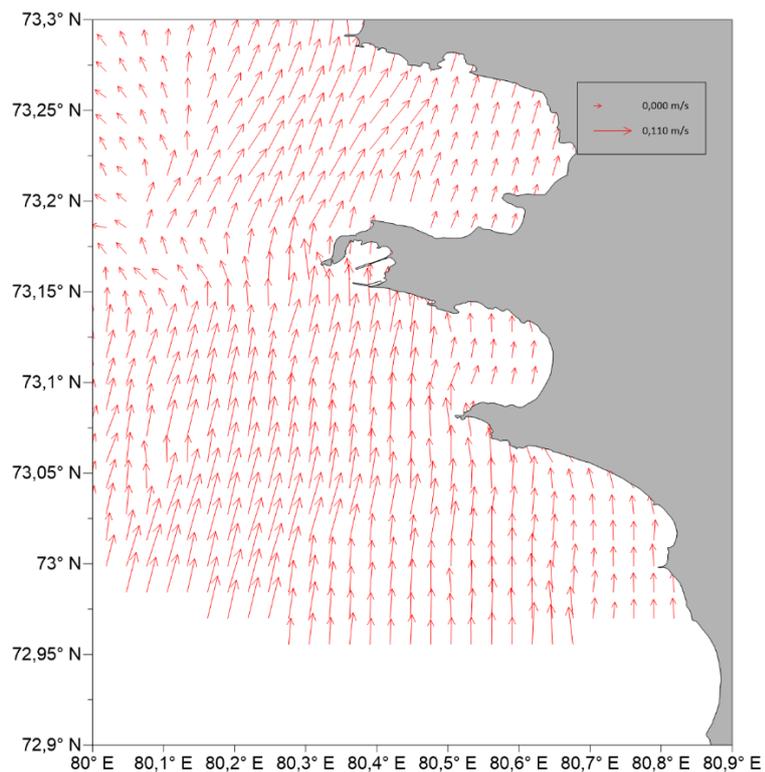


Рисунок 12 Распределение поля поверхностных течений в районе бухты Север Енисейского залива 15.07.2020 в 00:00

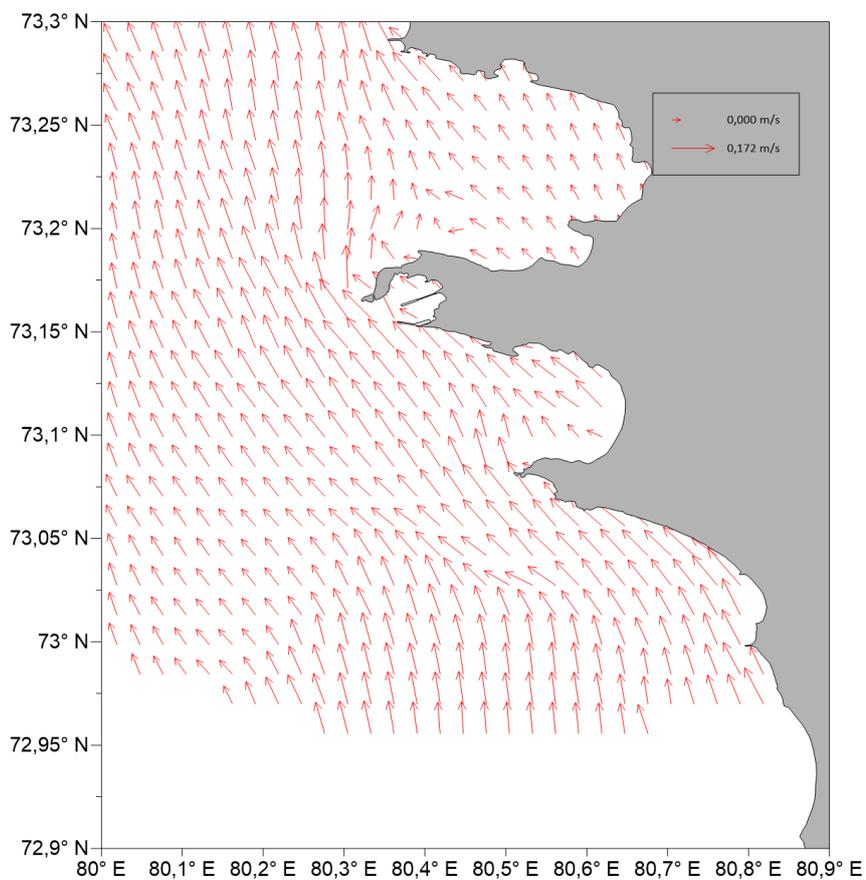


Рисунок 13 Распределение поля поверхностных течений в районе бухты Север Енисейского залива 15.08.2020 в 00:00

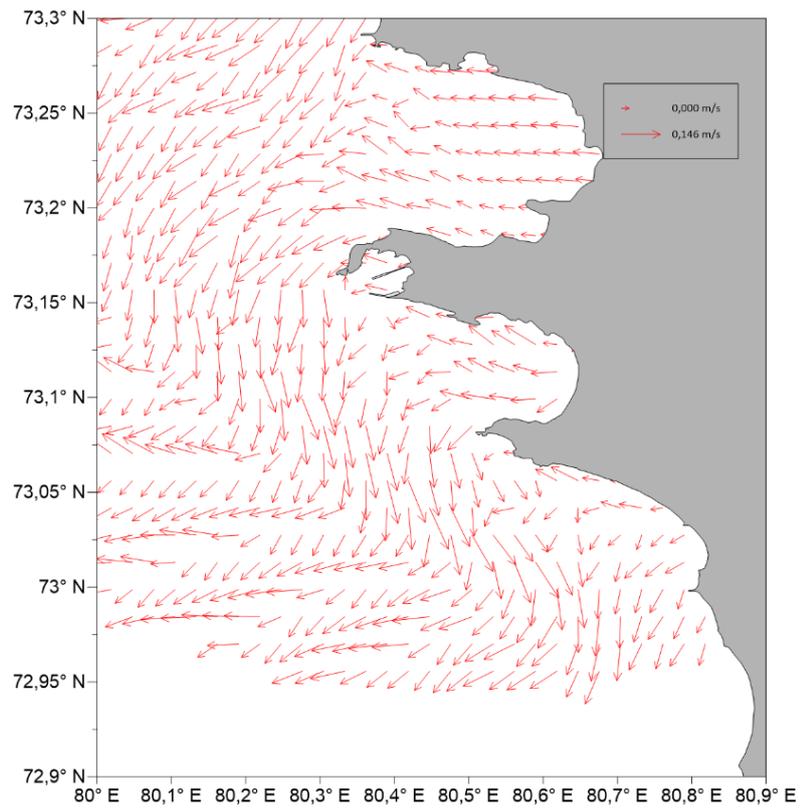


Рисунок 14 Распределение поля поверхностных течений в районе бухты Север Енисейского залива 15.09.2020 в 00:00

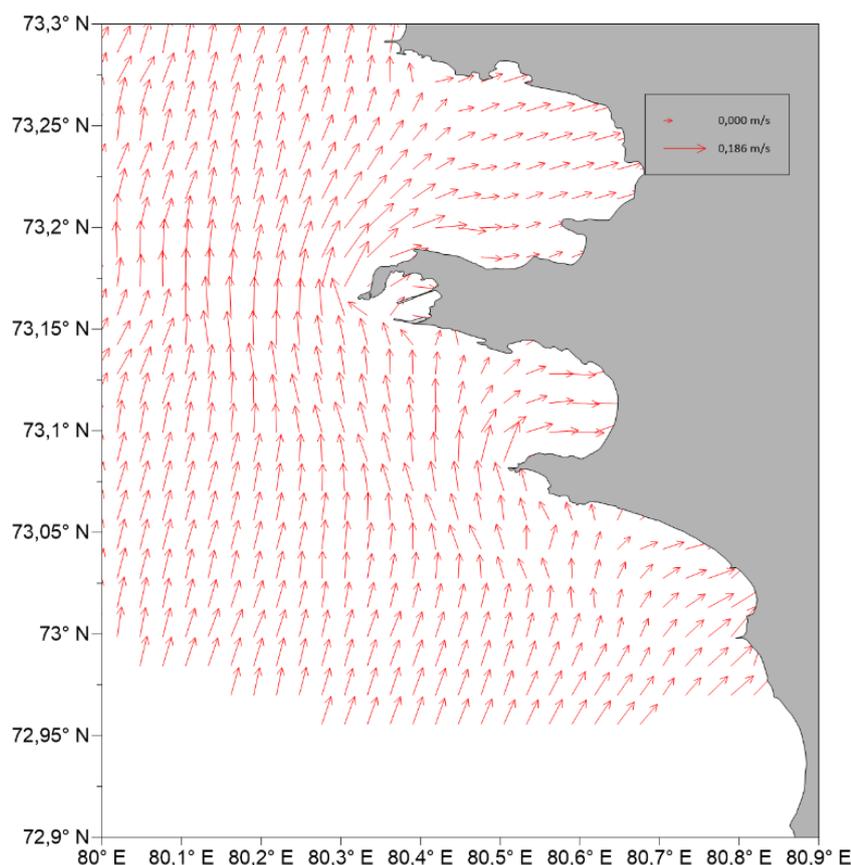


Рисунок 15 Распределение поля поверхностных течений в районе бухты Север Енисейского залива 15.10.2020 в 00:00

15 мая, под влиянием умеренного юго-западного ветра (до 5.95 м/с, рисунок 1), в районе исследования сформировалась сложная циркуляция с максимальными скоростями до 0.16 м/с (рисунок 9). В открытой части залива преобладал юго-восточный перенос водных масс, в то время как на входе в бухту Север образовался крупный антициклонический вихрь. Такая структура является результатом совмещения двух механизмов. Юго-восточное направление основного потока объясняется отклонением ветрового дрейфа вправо под действием силы Кориолиса. В свою очередь, вихревая структура — это следствие взаимодействия этого крупномасштабного течения со сложной батиметрией и орографией побережья.

Анализ обстановки на 15 июня выявил ключевую особенность: на фоне слабого северо-западного ветра (до 2.26 м/с) (рисунок 2) в заливе сформировалось одно из самых интенсивных течений за весь сезон.

Мощный и однородный поток был направлен строго на юг, достигая скоростей 0.22 м/с (рисунок 10) и не образуя значимых вихревых структур. Столь сильный отклик на слабое локальное воздействие указывает на то, что циркуляция в этот день определялась крупномасштабными факторами. Вероятнее всего, поток носил градиентный характер и был обусловлен баротропным уклоном уровня моря, а его траектория направлялась батиметрией глубоководного желоба.

Несмотря на сильный южный ветер (до 8.47 м/с, рисунок 3), смоделированное 15 июля поле течений (рисунок 11) оказалось самым слабым из рассмотренных, с максимальными скоростями лишь 0.11 м/с. Циркуляция была представлена однородным потоком на север, лишенным вихрей. Такая аномально слабая реакция вызвана тем, что ветер действовал в противофазе с доминирующим южным градиентным потоком, препятствуя ему и создавая лишь незначительное компенсационное течение.

Ситуация на 15 августа (рисунки 12 и 4) представляет собой классический пример прямого отклика морской системы на интенсивное и устойчивое ветровое воздействие. Мощный северо-западный ветер, достигавший 9.63 м/с (рисунок 4), сформировал сильное и однородное дрейфовое течение, направленное преимущественно на юг (рисунок 12). Максимальные скорости течений составили 0.172 м/с, при этом поле течений было стабильным и не содержало выраженных вихревых структур. В данном случае наблюдается практически прямая передача энергии от сильного ветра к водному потоку, траектория которого дополнительно направляется батиметрией глубоководного желоба.

Гидродинамическая обстановка на 15 сентября (рисунки 13 и 5) демонстрирует наиболее сложную структуру циркуляции из всех рассмотренных случаев, характеризующуюся формированием крупномасштабного вихря. Умеренный, но стабильный северо-западный

ветер (до 6.40 м/с, рисунок 5) привел к возникновению не единого потока, а сложной системы течений с максимальными скоростями до 0.146 м/с (рисунок 13). Центральную часть акватории занимает обширный циклонический вихрь (движение против часовой стрелки), который определяет разнонаправленный перенос водных масс. Такая кардинальная перестройка циркуляции является следствием взаимодействия ветрового потока со сложной орографией побережья. По-видимому, выступающий мыс в районе 73.1° с.ш. инициирует срыв потока и формирование устойчивой вихревой структуры, доминирующей над всей локальной динамикой.

На 15 октября (рисунки 14 и 6) вновь наблюдается режим интенсивного и упорядоченного переноса водных масс, несмотря на умеренное и разнонаправленное ветровое воздействие. При умеренном юго-западном ветре (до 6.40 м/с, рисунок 6) в заливе наблюдался один из самых сильных за весь сезон потоков, направленный строго на юг, с максимальными скоростями до 0.186 м/с (рисунок 14). Поле течений было однородным, без вихревых структур. Как и в июне, столь мощный отклик на локальный ветер маловероятен. Эта ситуация подтверждает гипотезу о существовании в Енисейском заливе доминирующего градиентного течения, которое в осенний период является основным механизмом переноса водных масс, и на которое локальный ветер оказывает лишь второстепенное влияние.

3.3. РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛНЕНИЯ

3.3.1 Высота волн (H_{sig})

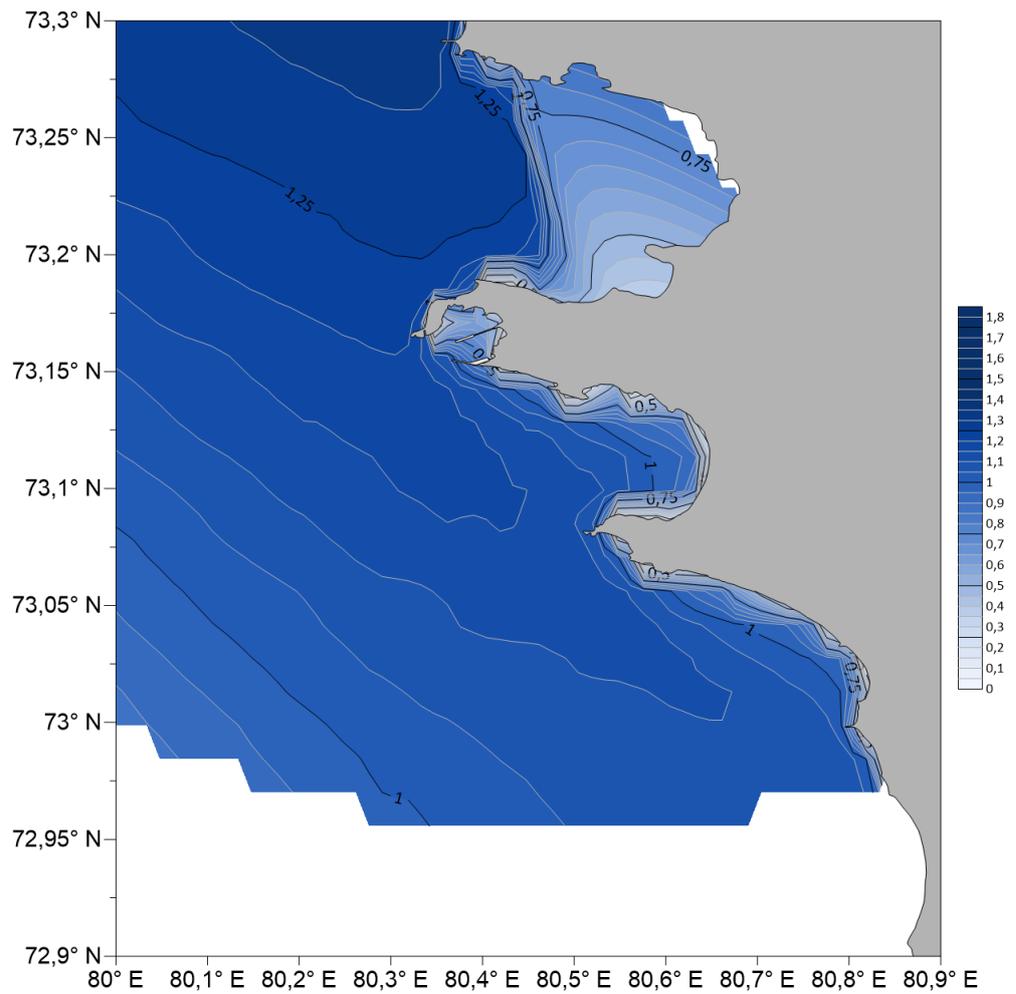


Рисунок 16 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 1.05.2020 в 00:00

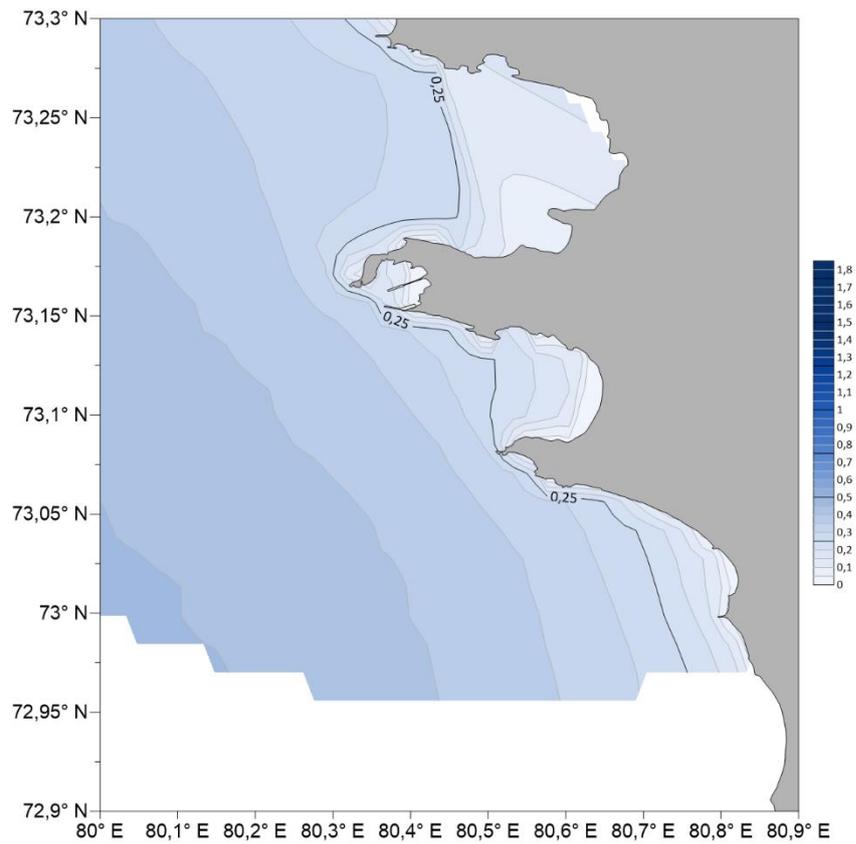


Рисунок 17 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 15.05.2020 в 00:00

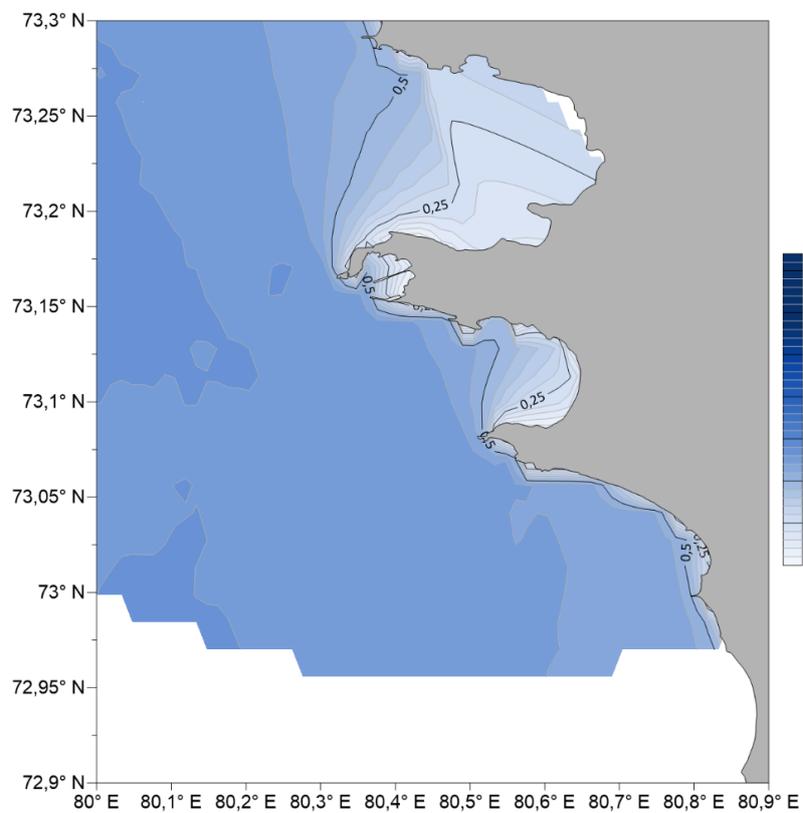


Рисунок 18 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 1.06.2020 в 00:00

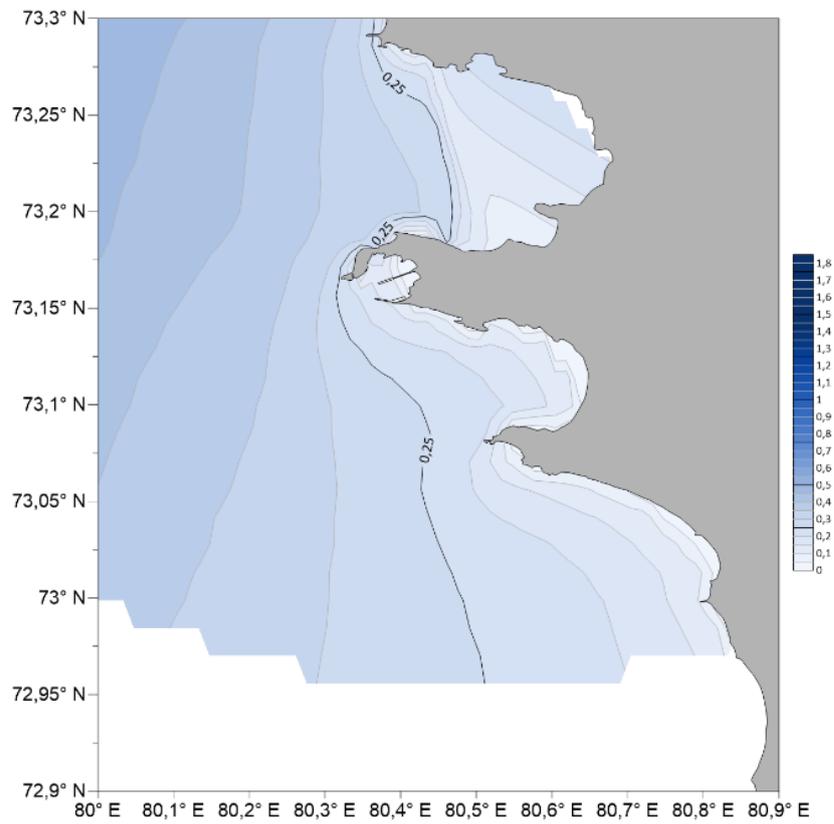


Рисунок 19 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 15.06.2020 в 00:00

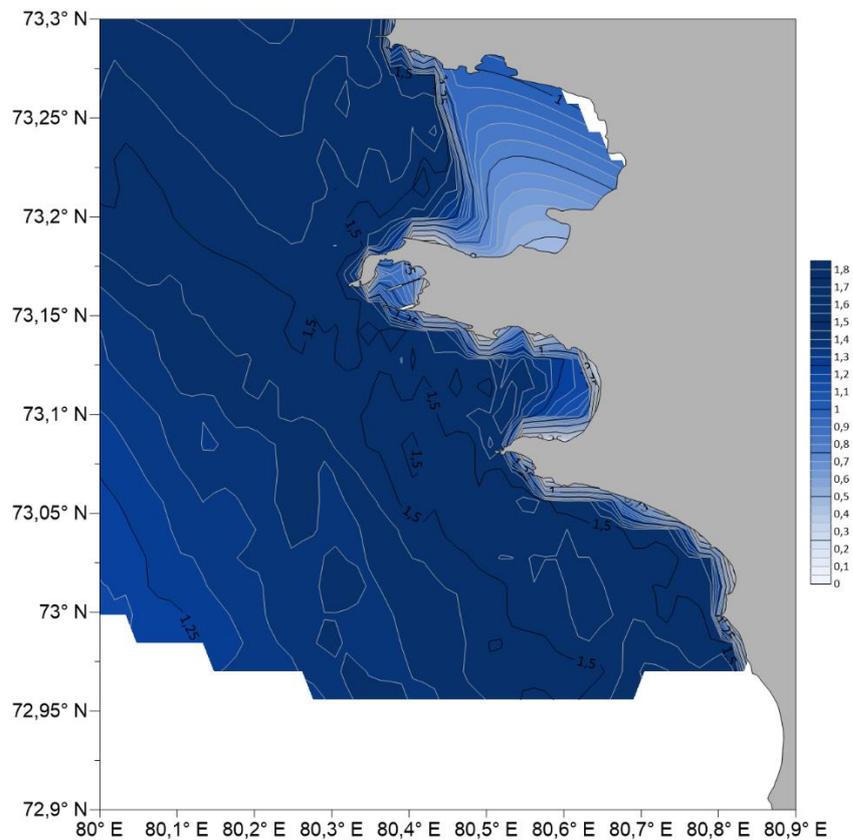


Рисунок 20 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 1.07.2020 в 00:00

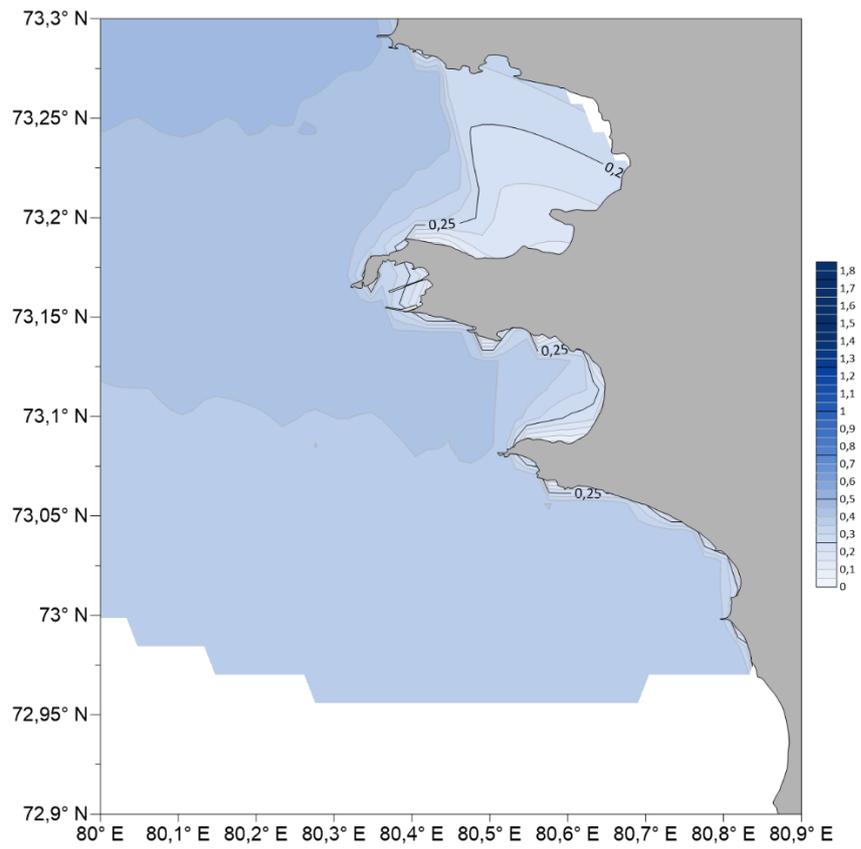


Рисунок 21 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 15.07.2020 в 00:00

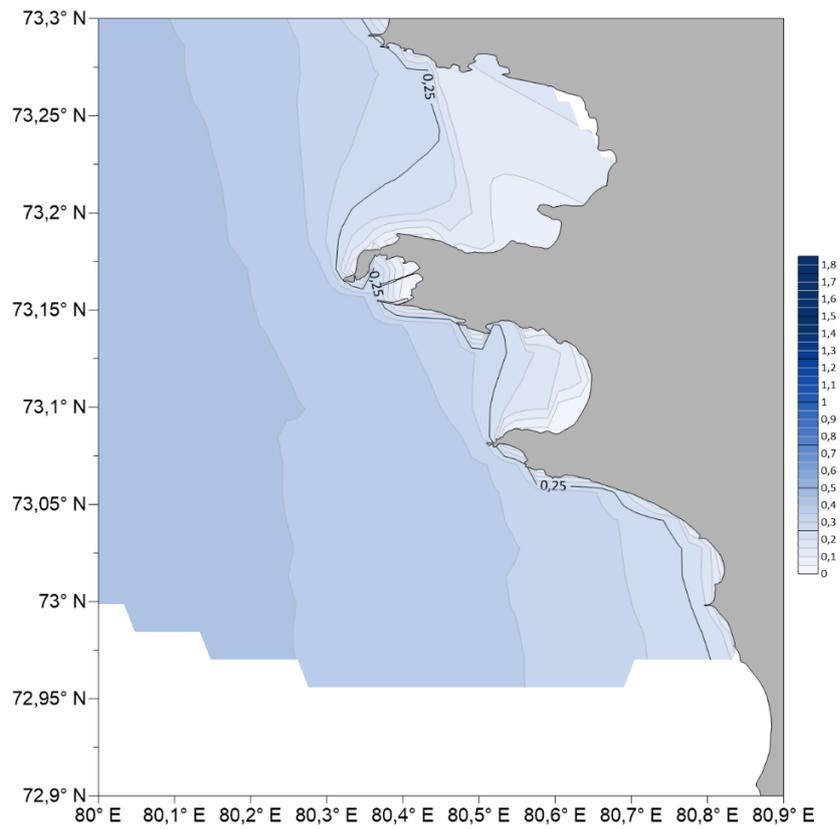


Рисунок 22 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 1.08.2020 в 00:00

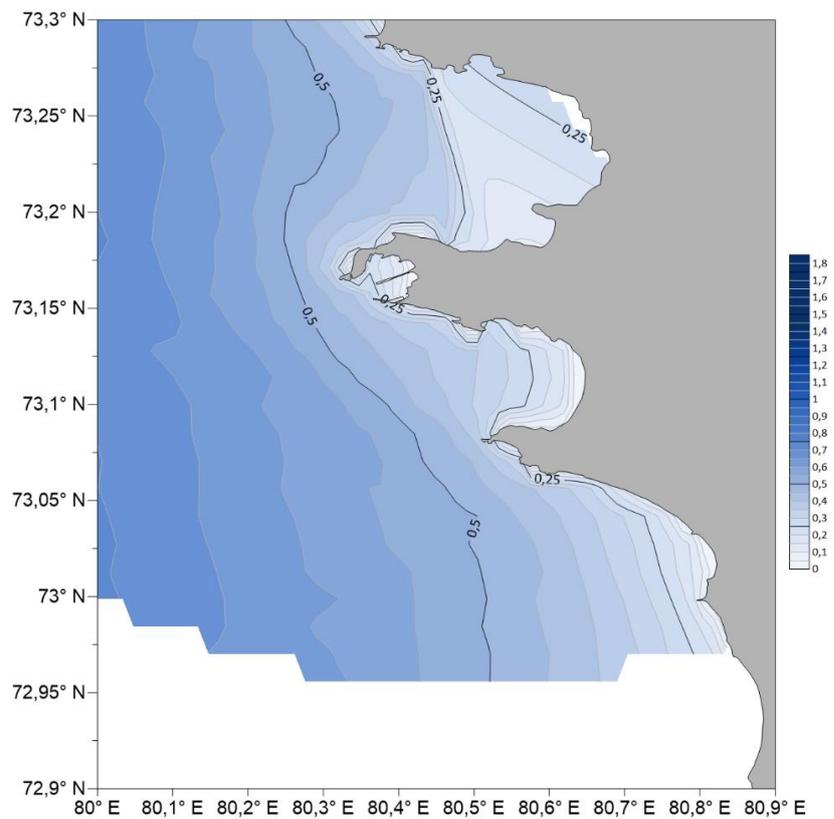


Рисунок 23 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 15.08.2020 в 00:00

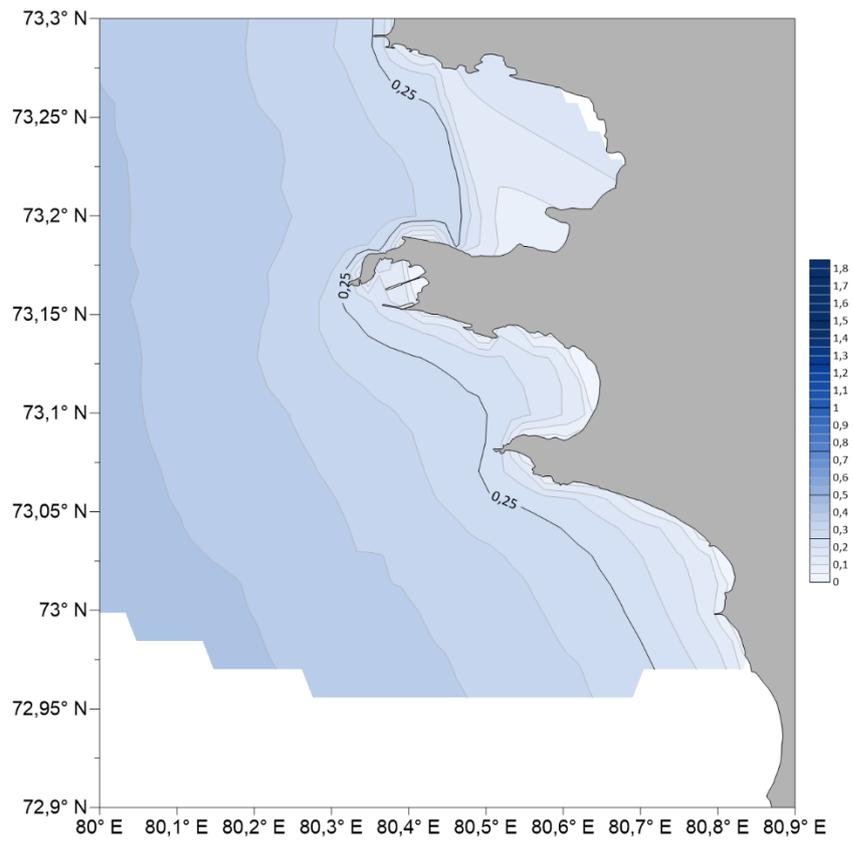


Рисунок 24 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 1.09.2020 в 00:00

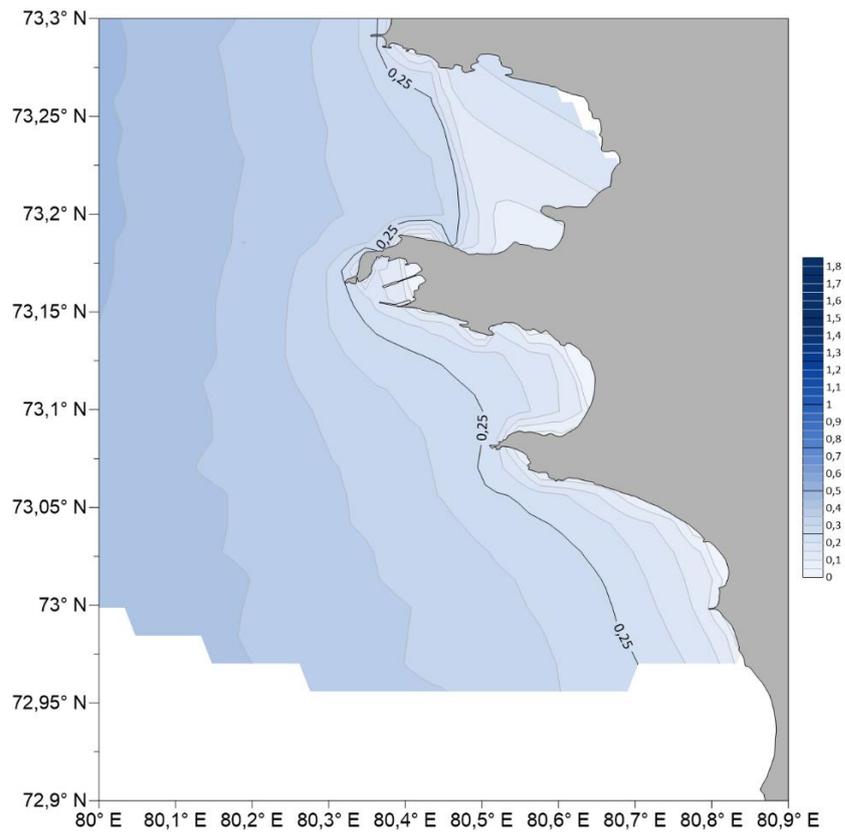


Рисунок 25 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 15.09.2020 в 00:00

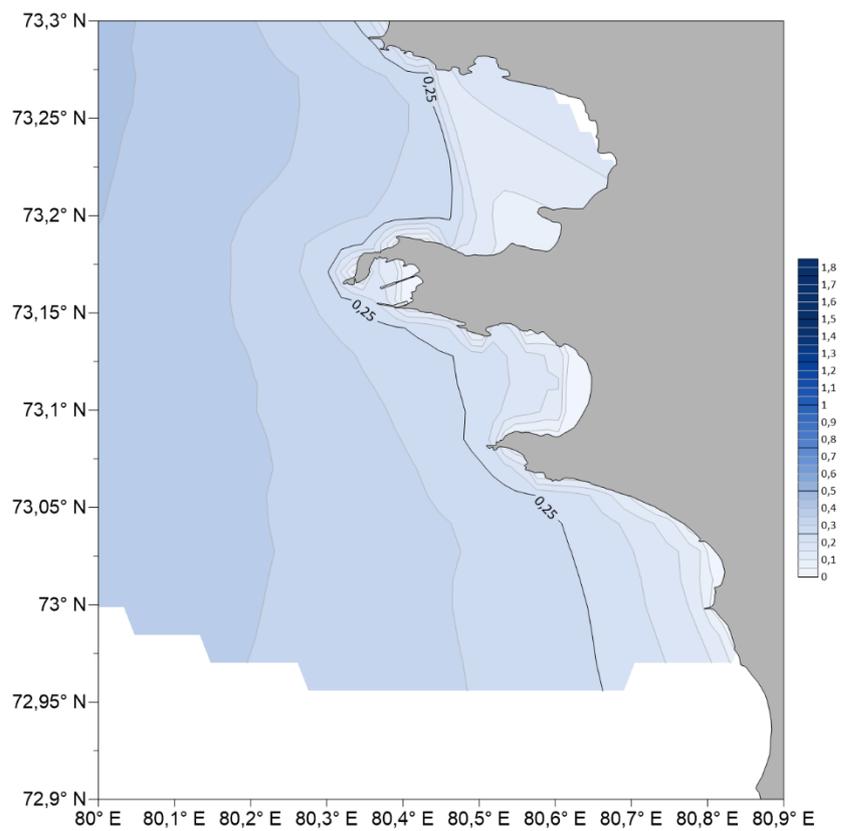


Рисунок 26 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 1.10.2020 в 00:00

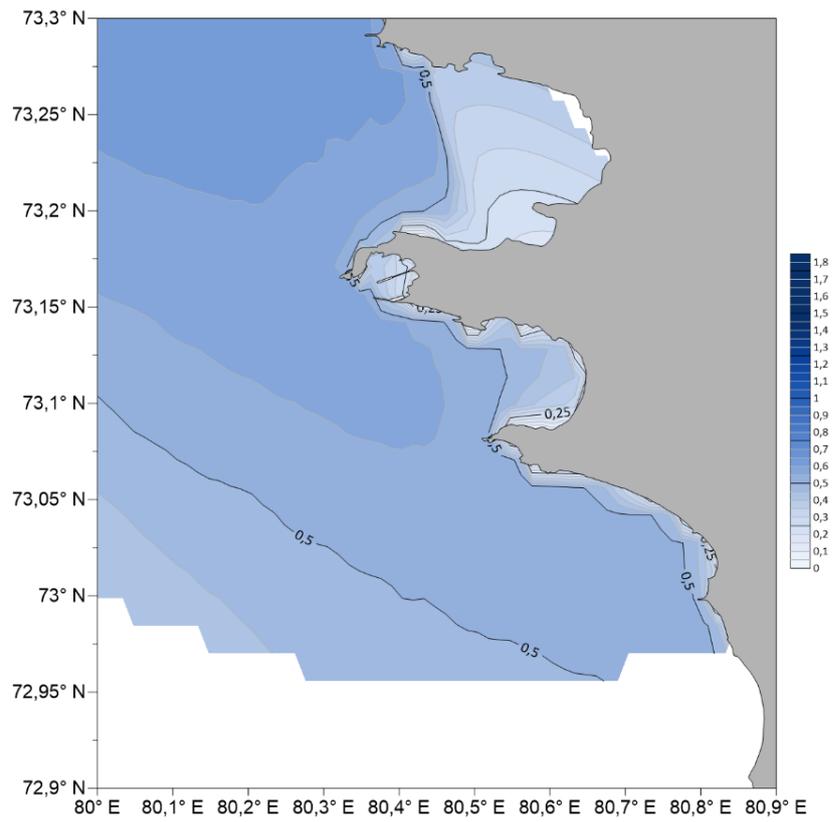


Рисунок 27 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 15.10.2020 в 00:00

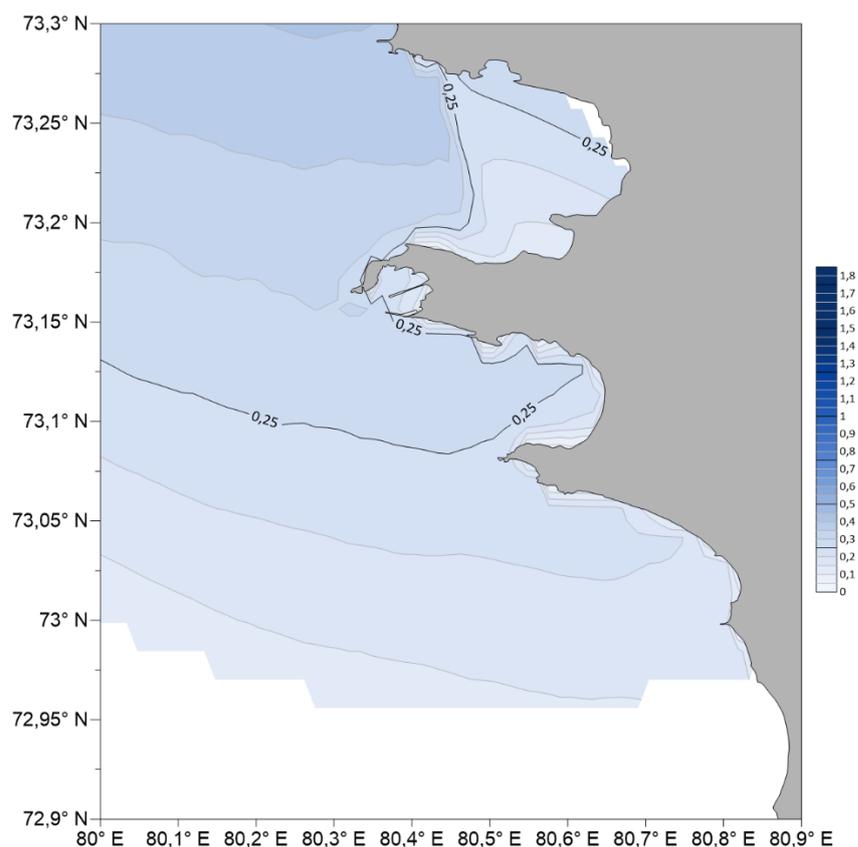


Рисунок 28 Распределение высоты волны h_{sig} (м) в районе бухты Север Енисейского залива 1.11.2020 в 00:00

Анализ результатов моделирования показал, что волновой режим в районе бухты Север крайне изменчив. Его характер определяется двумя основными факторами: нерегулярным возникновением штормовых ветров в безледовый период и началом ледообразования, подавляющего волнение, в конце сезона, что наглядно демонстрирует карта на 1 ноября. Наиболее интенсивный штормовой отклик был зафиксирован 1 июля, когда значительная высота волн в открытой части залива превышала 1.5 м. Важнейшей общей закономерностью является пространственное распределение волнения: для всех случаев наблюдалось значительное снижение высоты волн по мере их подхода к берегу, а сама бухта Север постоянно находилась в зоне «волновой тени», что обусловлено влиянием локальной батиметрии.

3.3.2. Средний период волн

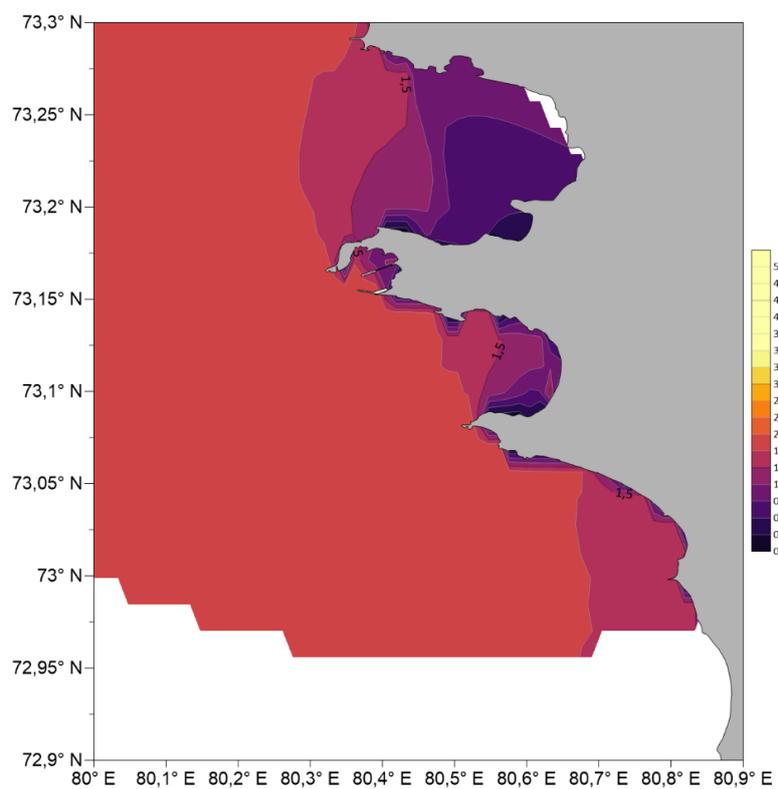


Рисунок 29 Распределение среднего периода волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.05.2020 в 00:00

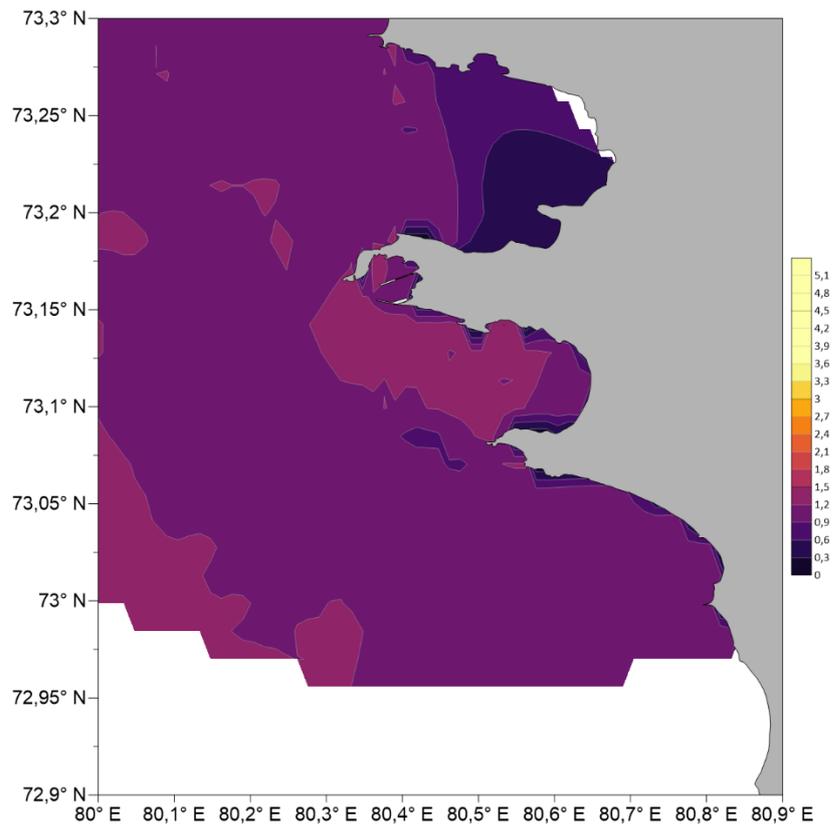


Рисунок 30 Распределение среднего периода волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.06.2020 в 00:00

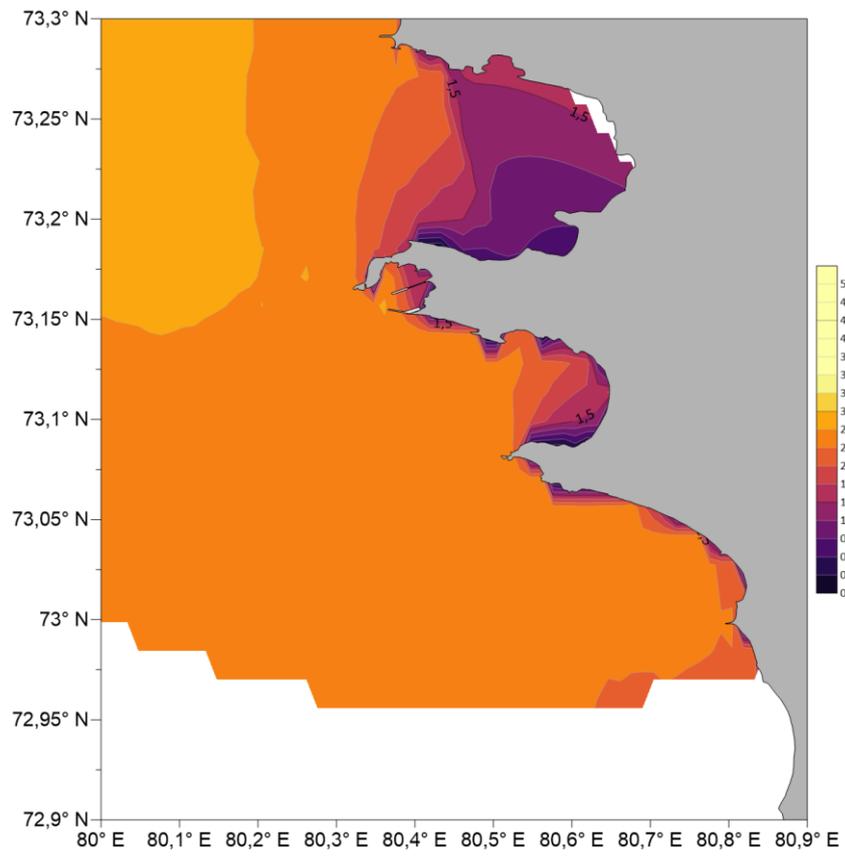


Рисунок 31 Распределение среднего периода волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.07.2020 в 00:00

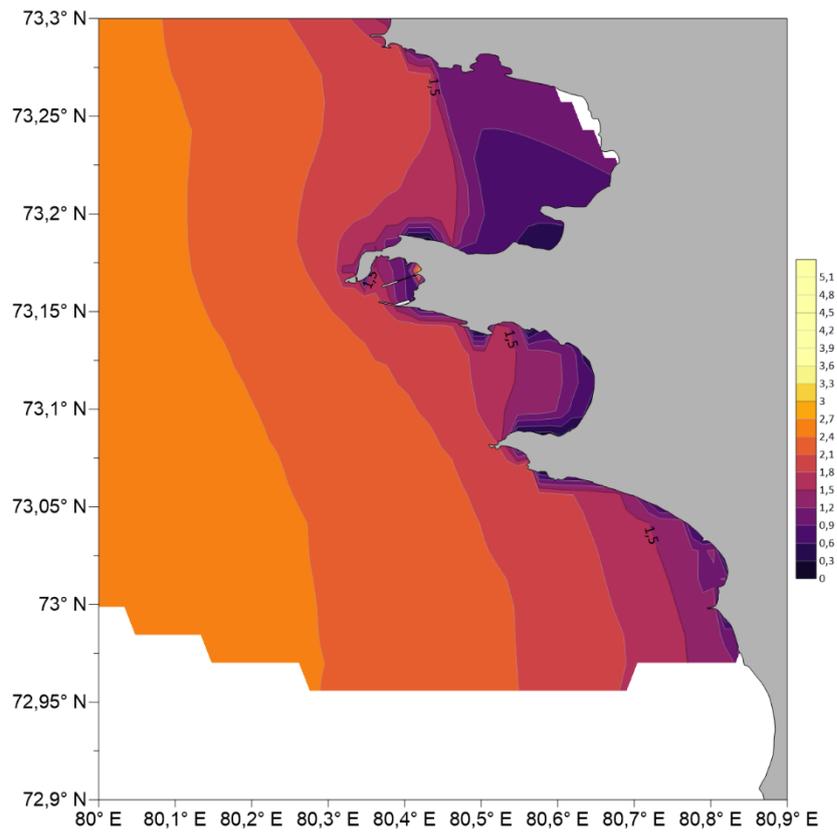


Рисунок 32 Распределение среднего периода волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.08.2020 в 00:00

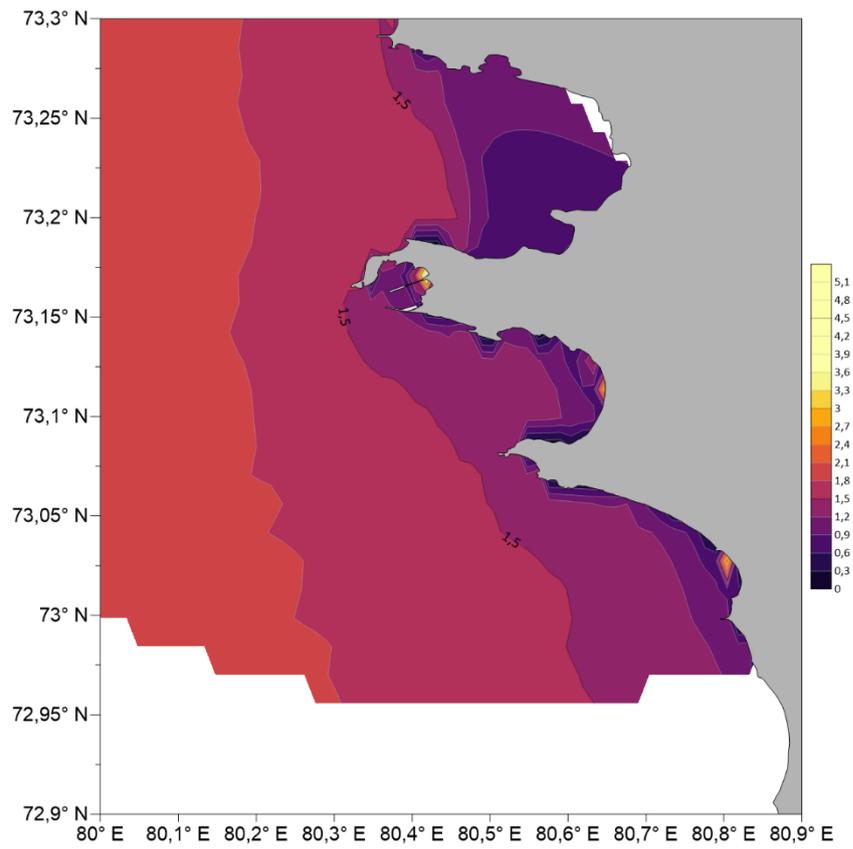


Рисунок 33 Распределение среднего периода волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.09.2020 в 00:00

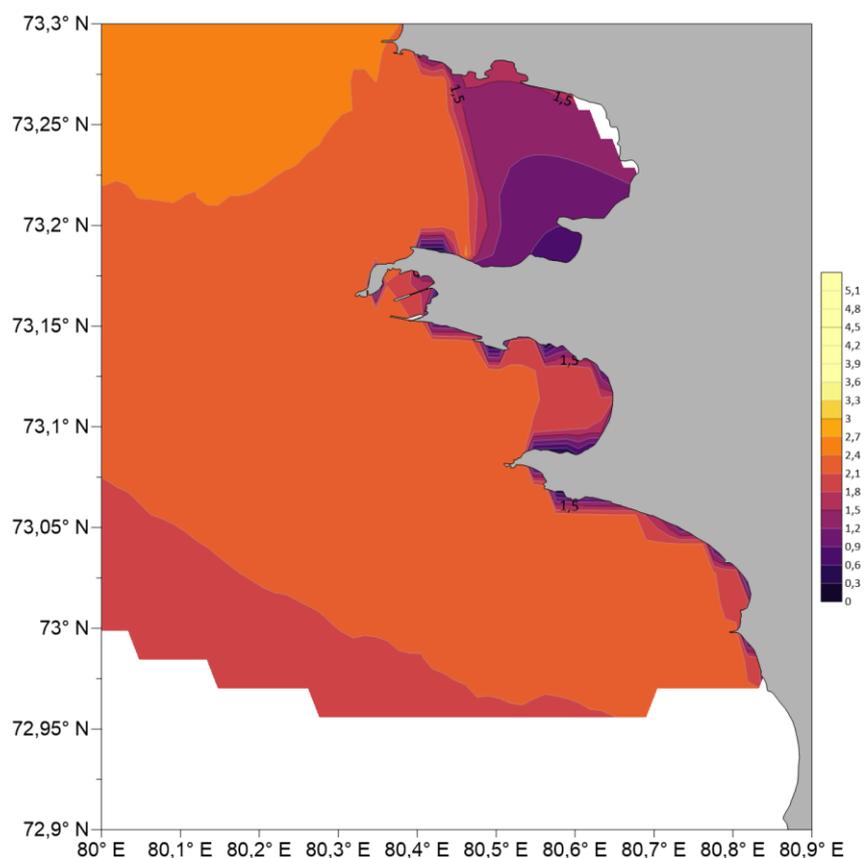


Рисунок 34 Распределение среднего периода волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.10.2020 в 00:00

Анализ карт распределения среднего периода волн (T_m) также выявляет выраженную сезонную изменчивость и устойчивые пространственные закономерности. Этот параметр, характеризующий временной масштаб волнения, напрямую связан с условиями ветрового воздействия и стадией развития волн. В начале безледового сезона наблюдаются относительно короткопериодные волны. В мае (рисунок 28) средний период в открытой части акватории составляет около 2.1 секунды, а в июне (рисунок 29) отмечаются минимальные значения за весь сезон — менее 1.5 секунды. Это свидетельствует о преобладании неразвитого, локально генерируемого ветрового волнения. Период максимальных значений T_m приходится на середину лета. Наиболее длиннопериодное волнение зафиксировано 15 июля (рисунок 30), когда средний период достигал 3.6 секунды. Длинные периоды также характерны для августа

(рисунок 31) и октября (рисунок 33), со значениями до 3.0-3.3 секунды. Такие параметры указывают на присутствие в заливе волн зыби, пришедших с обширных акваторий Карского моря, где волны успели полностью развиться под действием сильных ветров. Важной закономерностью, общей для всех рассмотренных случаев, является устойчивое уменьшение среднего периода волн по мере их распространения из открытой части залива к побережью. На всех картах видно, как длиннопериодное волнение, доминирующее на глубокой воде, трансформируется, и в прибрежной зоне, а особенно в акватории бухты Север, преобладают волны с коротким периодом (менее 1.5-2 с). Это объясняется тем, что бухта защищена от проникновения зыби, и волновой режим внутри нее определяется преимущественно локальными, короткопериодными ветровыми волнами.

3.3.3. Средняя длина волны

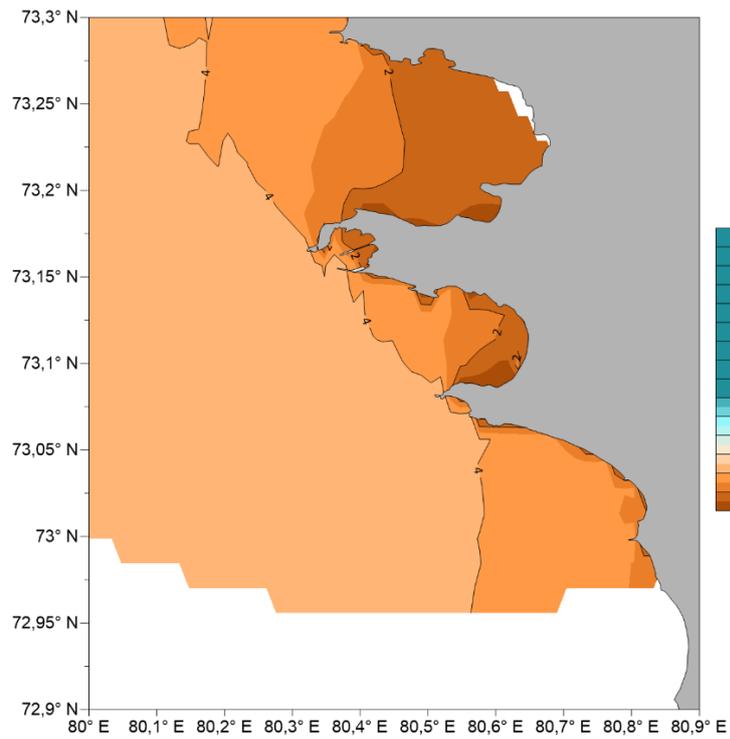


Рисунок 35 Распределение средней длины волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.05.2020 в 00:00

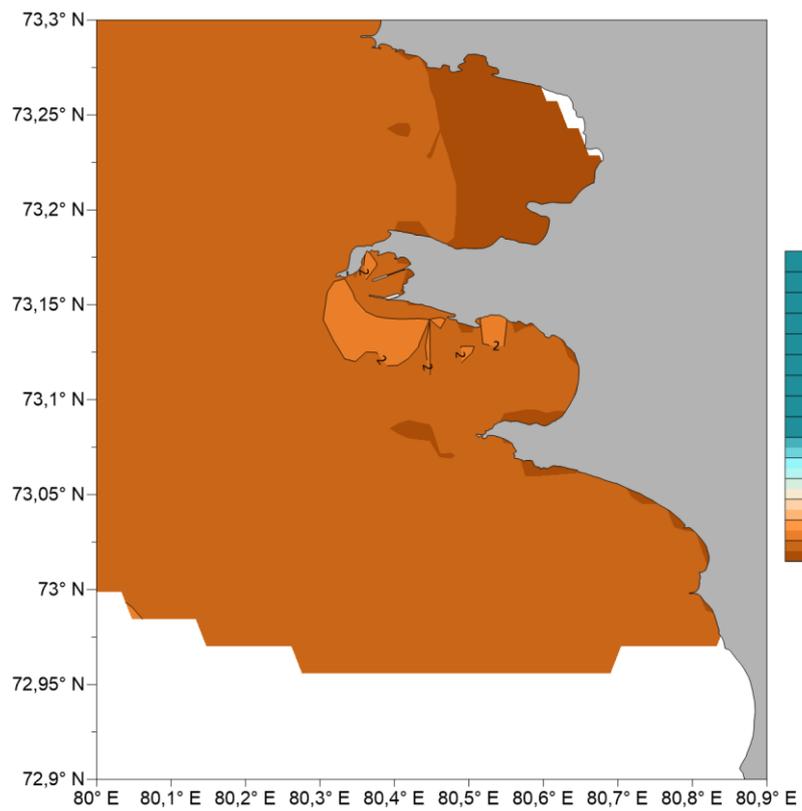


Рисунок 36 Распределение средней длины волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.06.2020 в 00:00

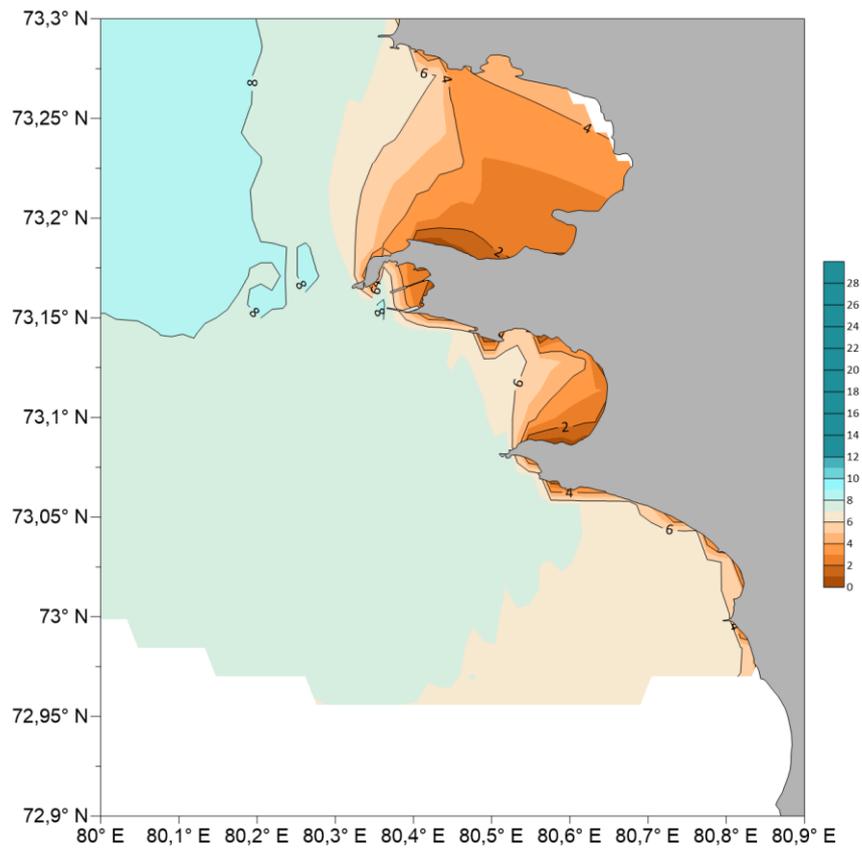


Рисунок 37 Распределение средней длины волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.07.2020 в 00:00

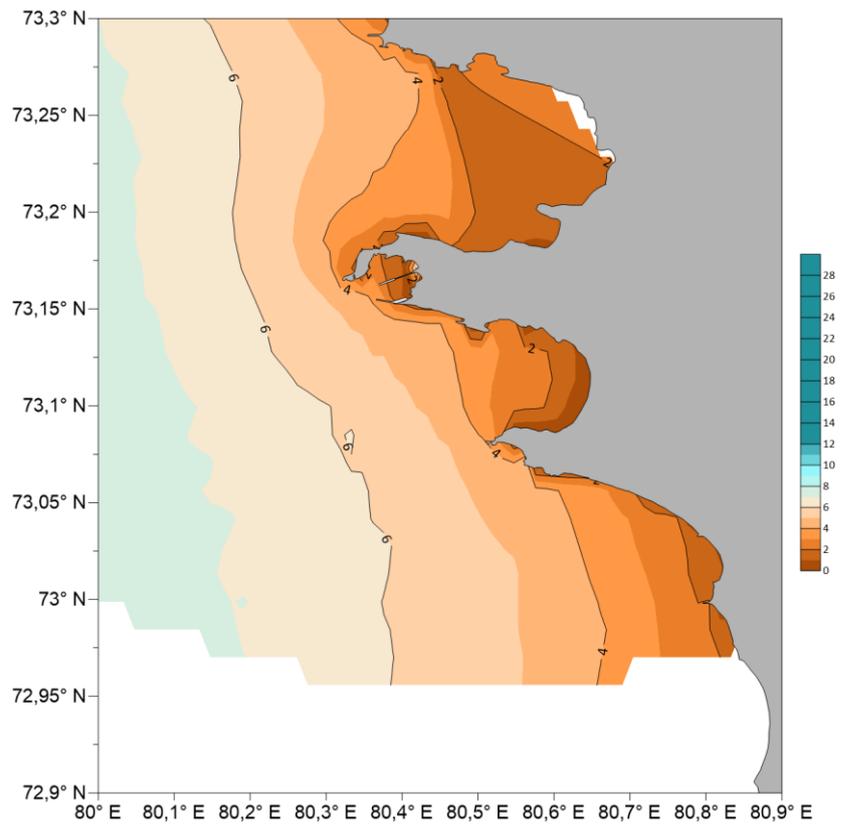


Рисунок 38 Распределение средней длины волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.08.2020 в 00:00

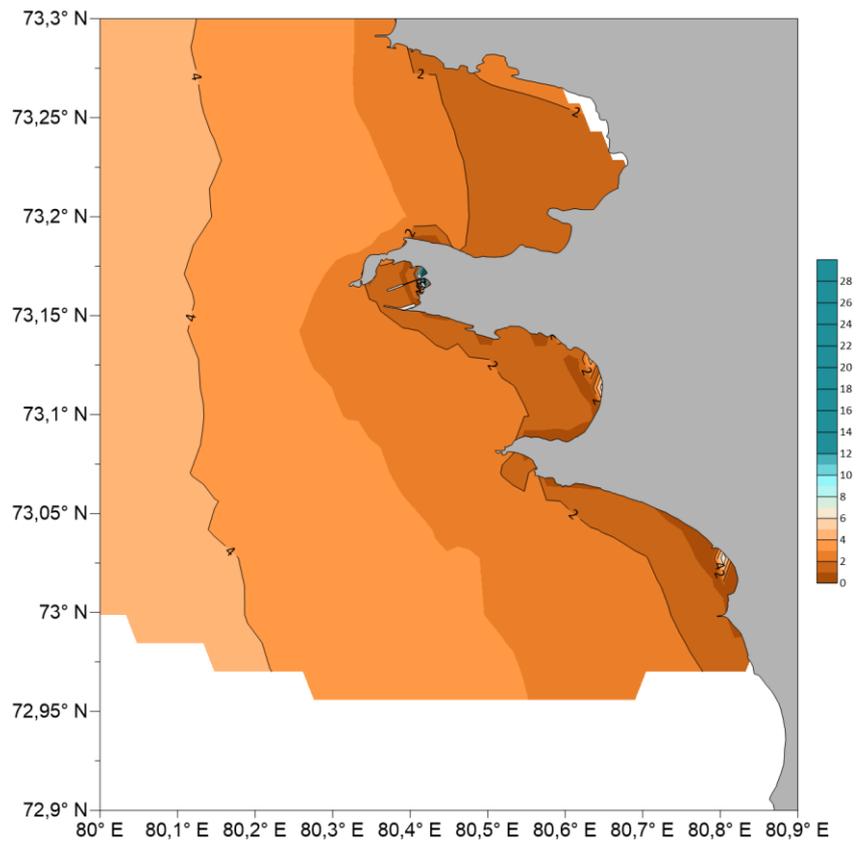


Рисунок 39 Распределение средней длины волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.09.2020 в 00:00

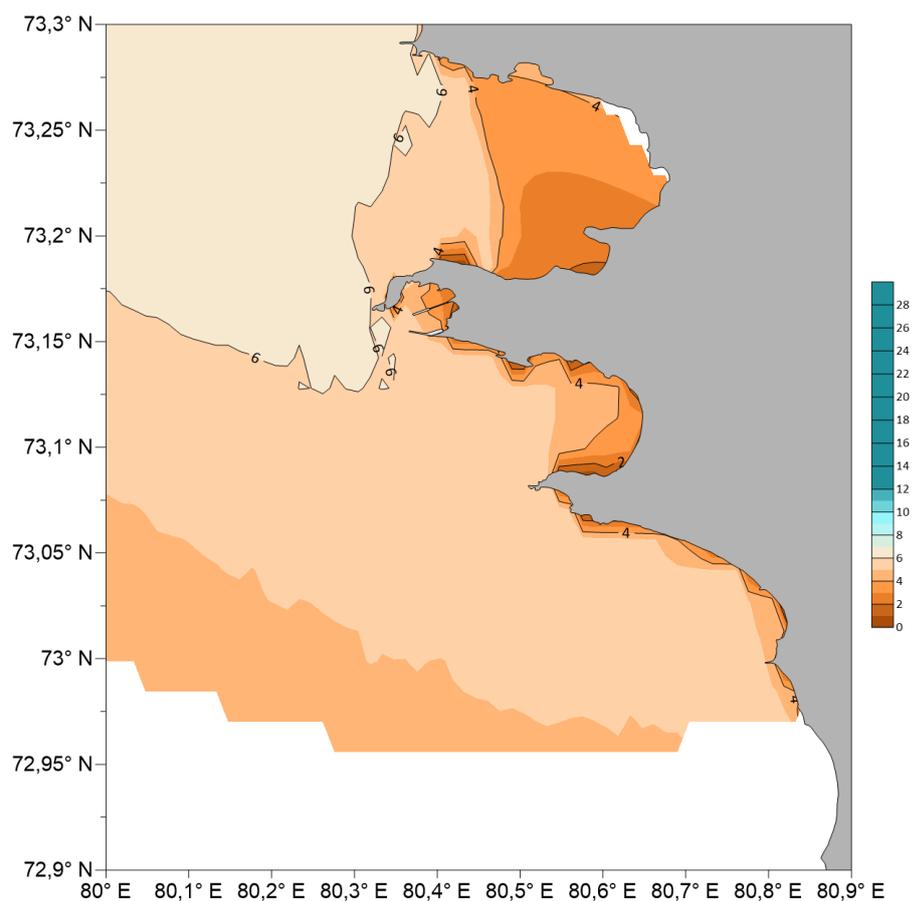


Рисунок 40 Распределение средней длины волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.10.2020 в 00:00

Анализ распределения средней длины волны (рисунки 34-39) полностью подтверждает выводы, сделанные при рассмотрении периода волн. Пространственная и временная изменчивость этих двух параметров, связанных дисперсионным соотношением, практически идентична. Максимальные длины волн, превышающие 10–12 м, наблюдались 15 июля (рисунок 36), что соответствует периоду доминирования длиннопериодной зыби. Минимальные значения (менее 2 м) были зафиксированы 15 июня (рисунок 35), в условиях спокойного, короткопериодного волнения.

Наиболее важной общей чертой является четко выраженный градиент длин волн от открытой части залива к побережью. Длинные волны, существующие на глубокой воде, при выходе на прибрежное мелководье испытывают трансформацию, и их длина закономерно уменьшается. В то же время, в защищенной от проникновения зыби

акватории бухты Север доминирует короткое локальное волнение. Это объясняет постоянно наблюдаемые там минимальные длины волн (менее 2-4 м) во всех рассмотренных синоптических ситуациях.

3.3.4. Крутизна волны

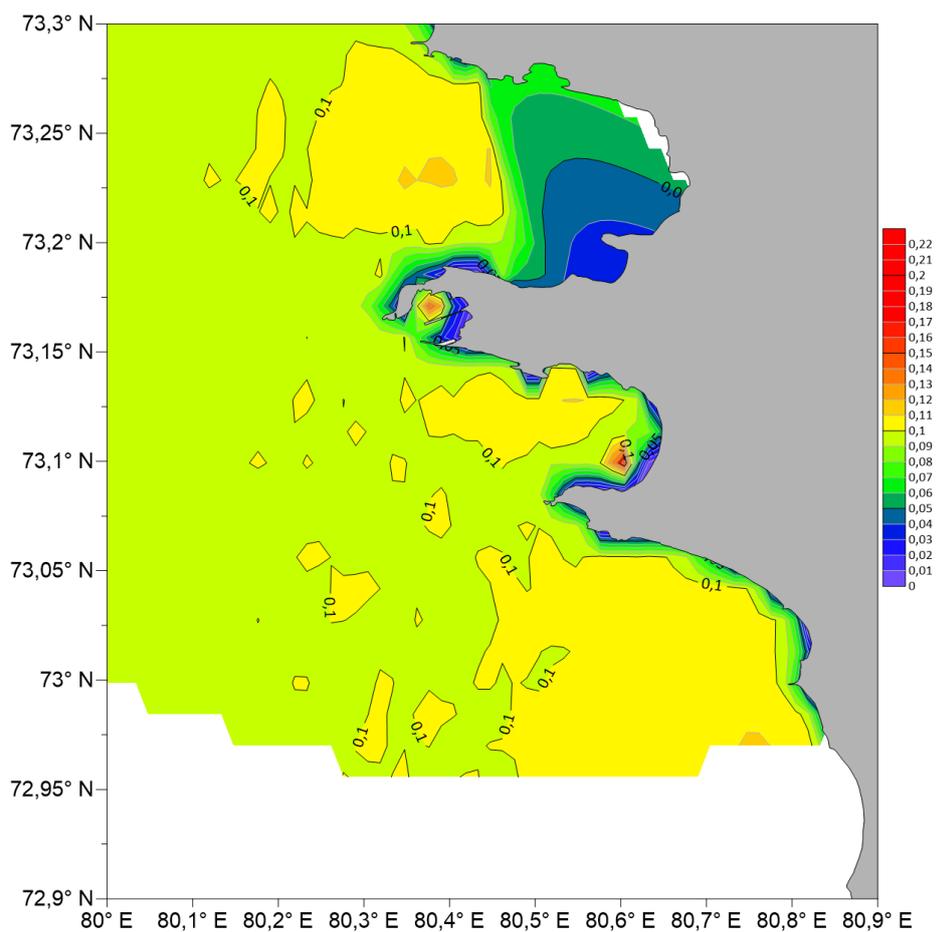


Рисунок 41 Распределение крутизны волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.05.2020 в 00:00

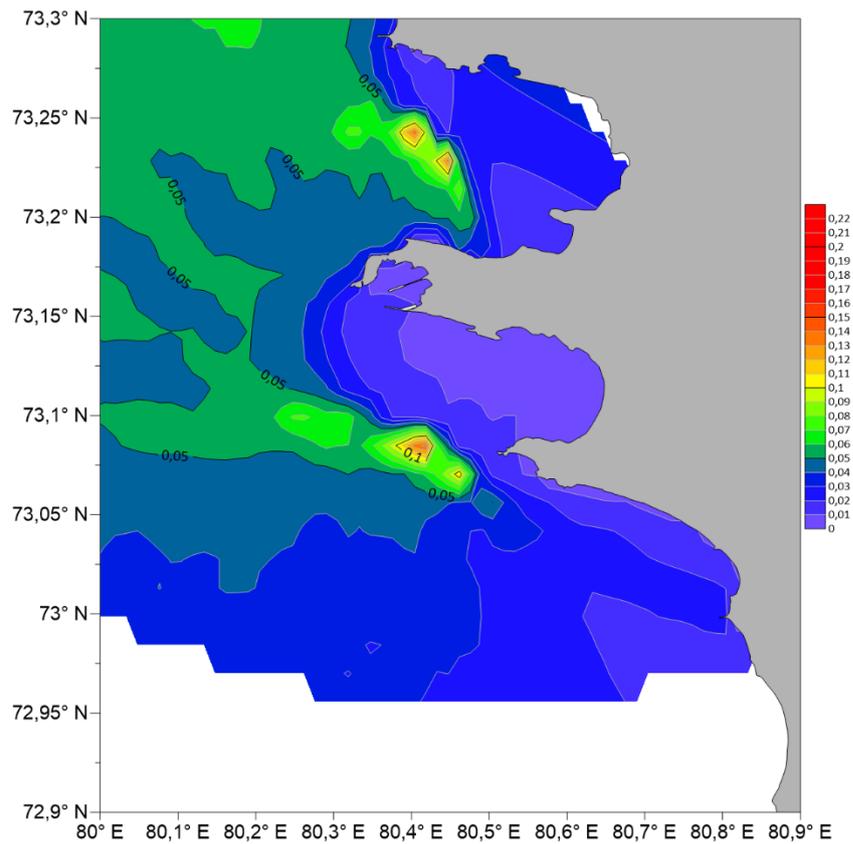


Рисунок 42 Распределение крутизны волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.06.2020 в 00:00

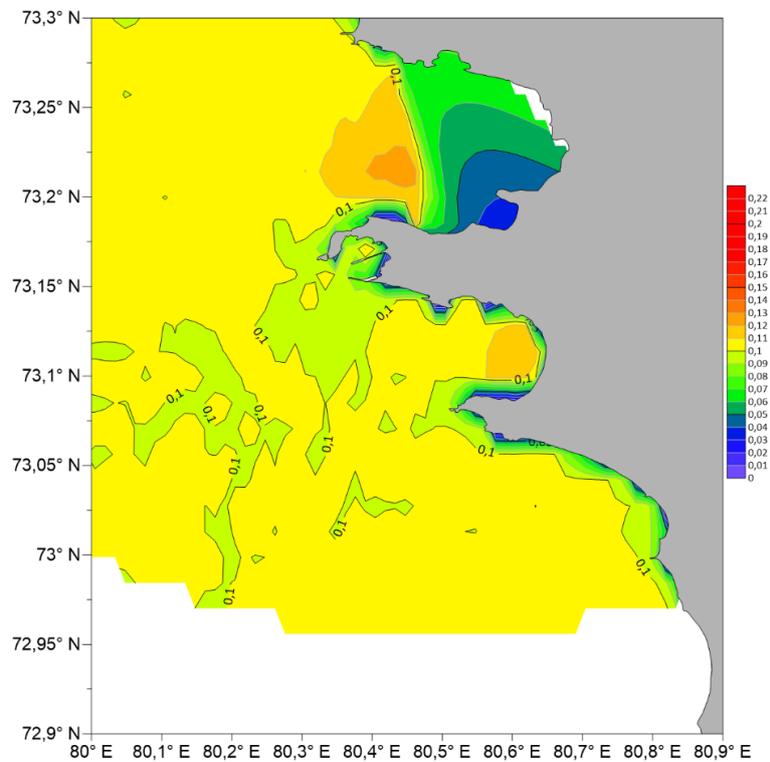


Рисунок 43 Распределение крутизны волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.07.2020 в 00:00

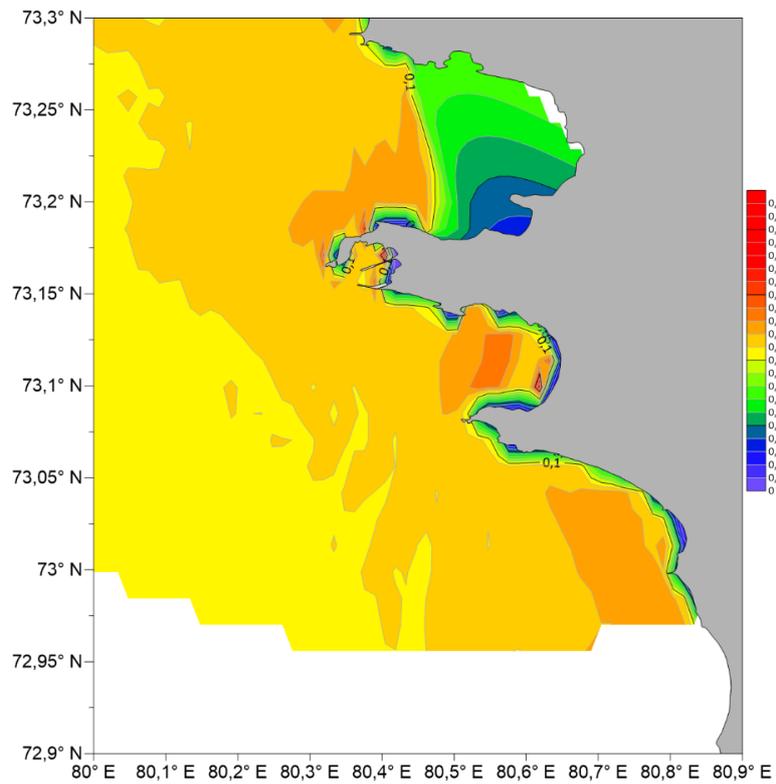


Рисунок 44 Распределение крутизны волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.08.2020 в 00:00

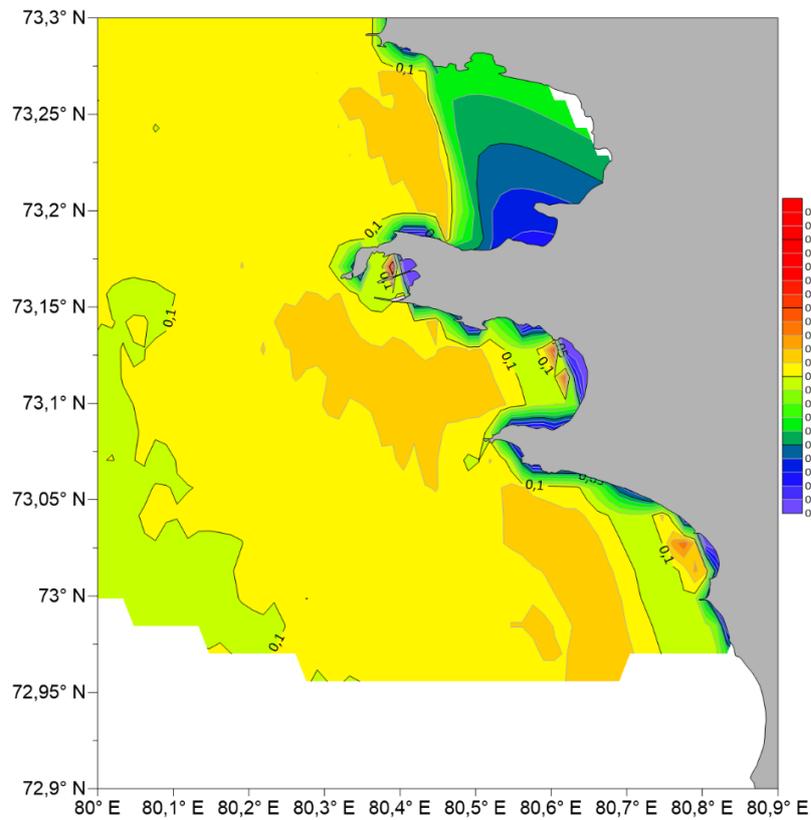


Рисунок 45 Распределение крутизны волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.09.2020 в 00:00

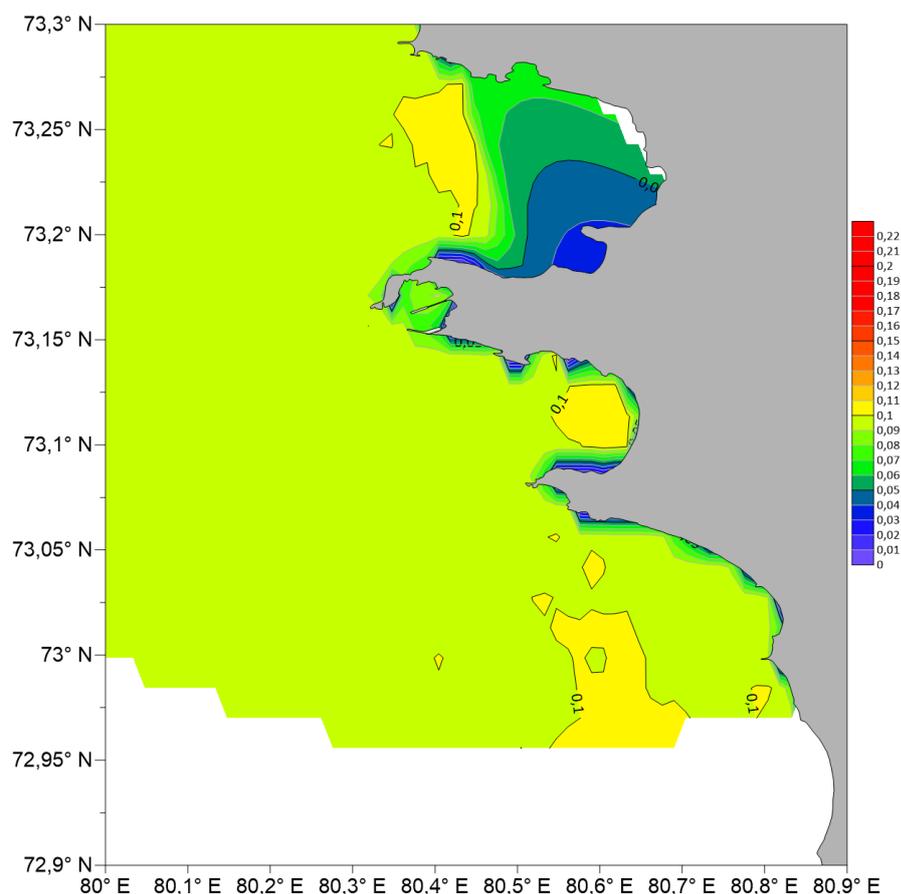


Рисунок 46 Распределение крутизны волны в районе бухты Север Енисейского залива 15.10.2020 в 00:00

Анализ карт распределения крутизны волны — безразмерного параметра, характеризующего отношение высоты волны к ее длине, — позволяет оценить стабильность волнения и выявить зоны его возможного обрушения. Распределение этого параметра (рисунки 40-45) демонстрирует закономерности, противоположные распределению длины и периода волн, и напрямую связано с рельефом дна. Во всех рассмотренных ситуациях, за исключением июня, наблюдается общая тенденция: минимальные значения крутизны (менее 0.05) приурочены к открытой, глубоководной части акватории, в то время как максимальные значения концентрируются в узкой прибрежной зоне. Это объясняется процессами трансформации волн на мелководье. Длинные и пологие волны зыби, приходящие из открытой части залива, при уменьшении глубины

резко сокращают свою длину, что приводит к значительному росту их крутизны до 0.1-0.12 и последующему обрушению у берега. Зоны повышенной крутизны четко оконтуривают мысы и вход в бухту Север.

Исключением является ситуация 15 июня (рисунок 41), когда на всей акватории наблюдались очень низкие значения крутизны (менее 0.05). Это полностью соответствует ранее сделанным выводам о наиболее спокойном волнении в этот день, с малыми высотами и короткими длинами волн, которые не достигают порога обрушения даже при подходе к берегу.

3.3.5. Уровень воды

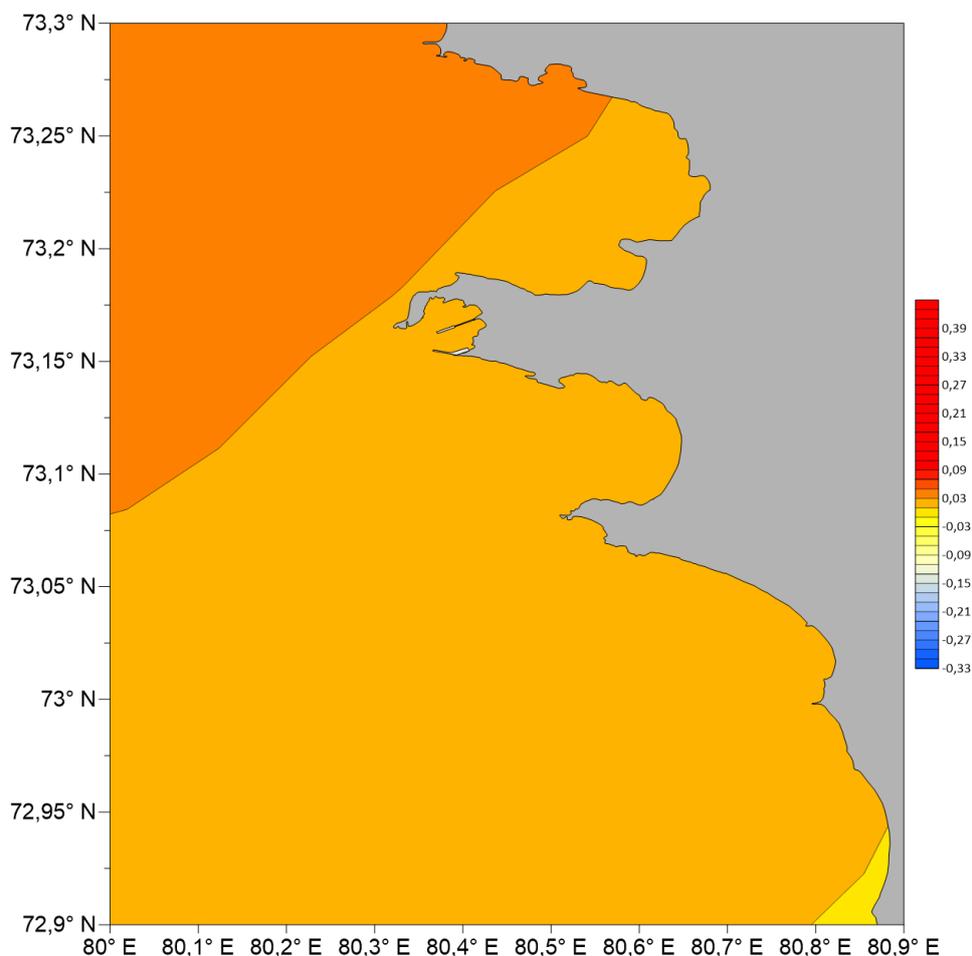


Рисунок 47 Распределение уровня воды в районе бухты Север Енисейского залива 15.05.2020 в 00:00

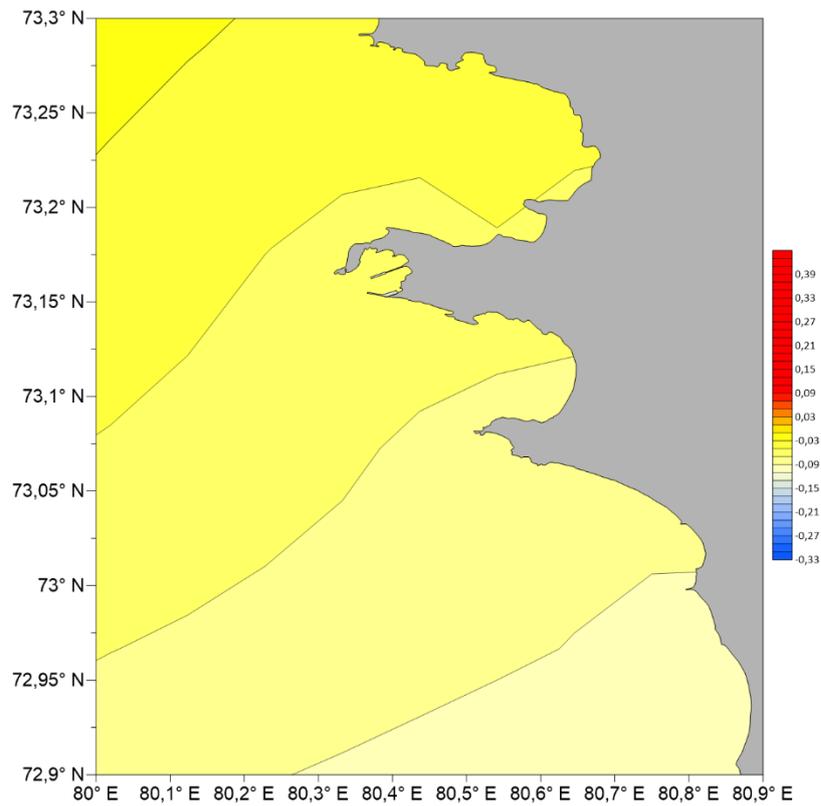


Рисунок 48 Распределение уровня воды в районе бухты Север Енисейского залива 15.06.2020 в 00:00

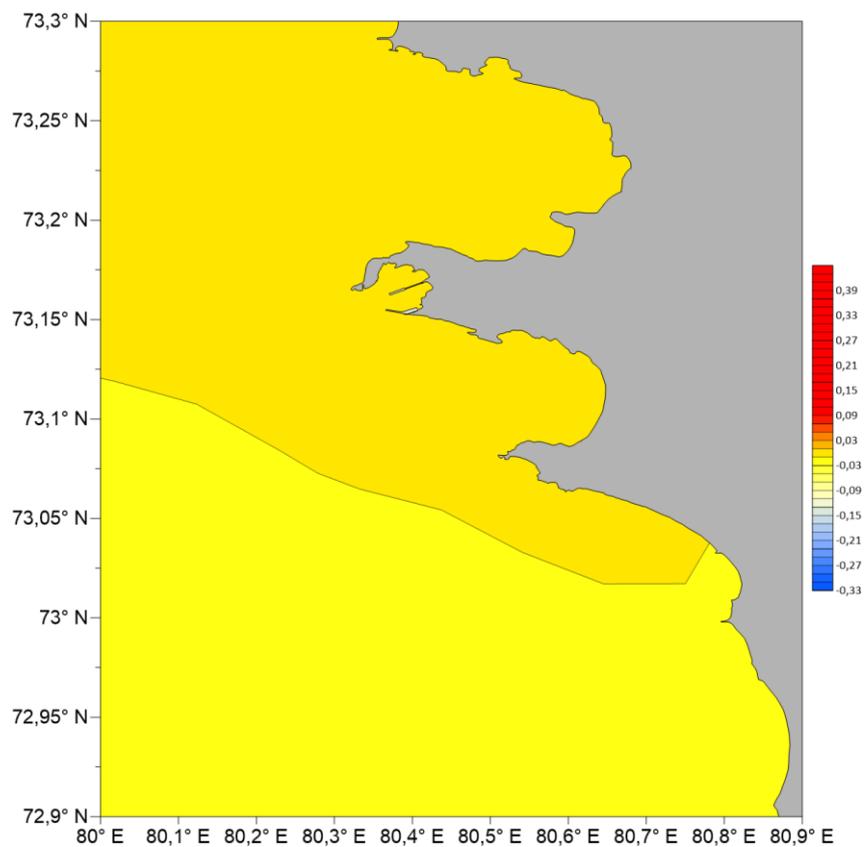


Рисунок 49 Распределение уровня воды в районе бухты Север Енисейского залива 15.07.2020 в 00:00

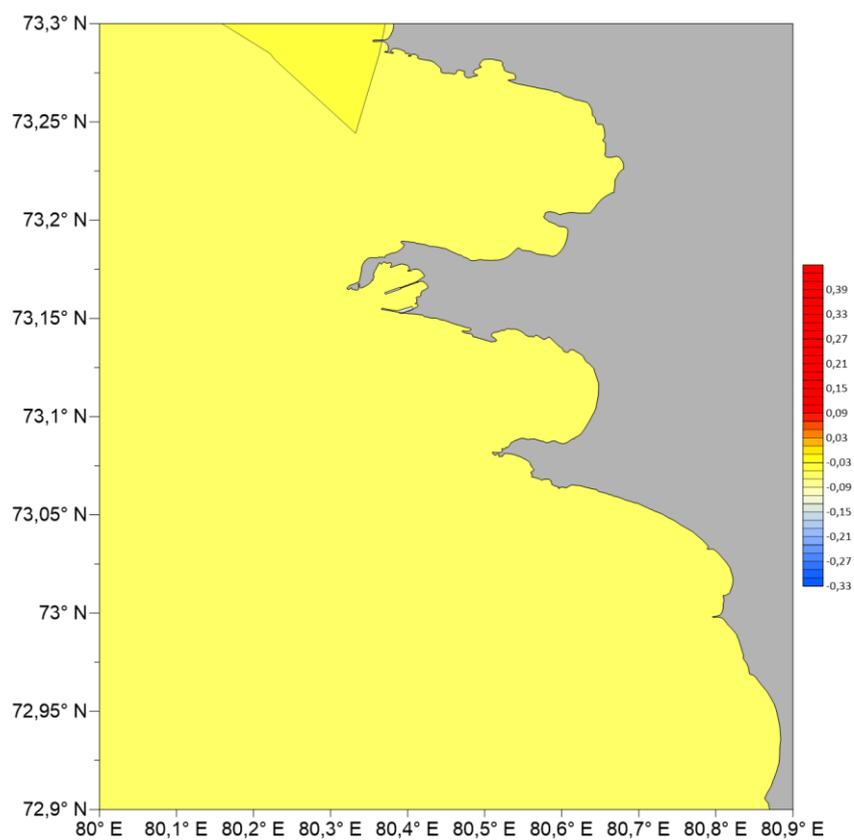


Рисунок 50 Распределение уровня воды в районе бухты Север Енисейского залива 15.08.2020 в 00:00

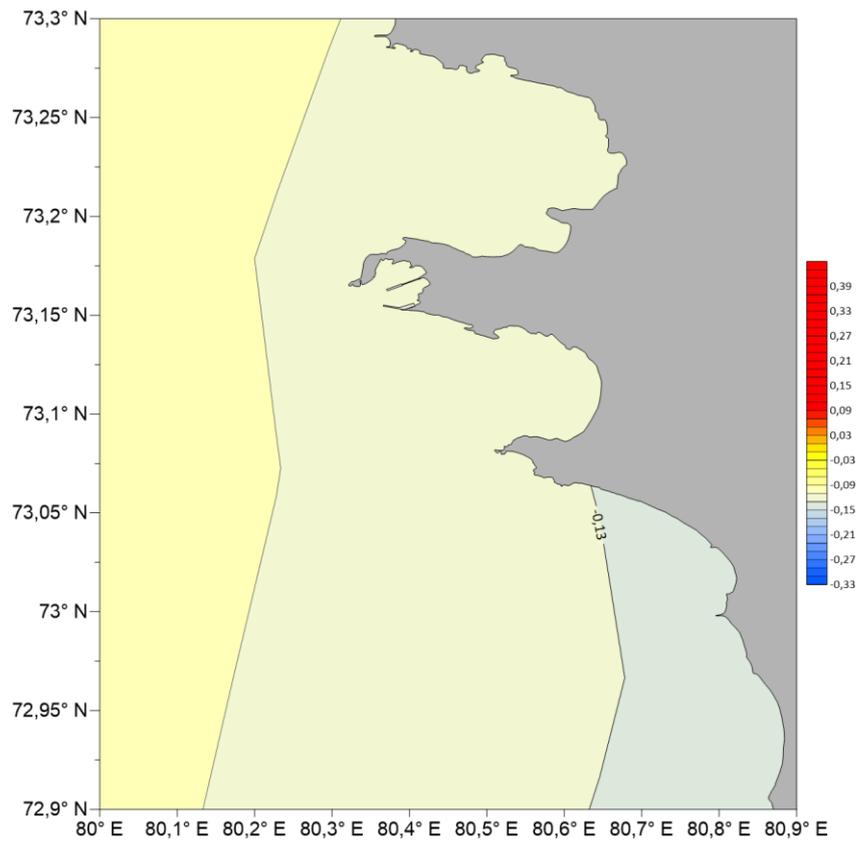


Рисунок 51 Распределение уровня воды в районе бухты Север Енисейского залива 15.09.2020 в 00:00

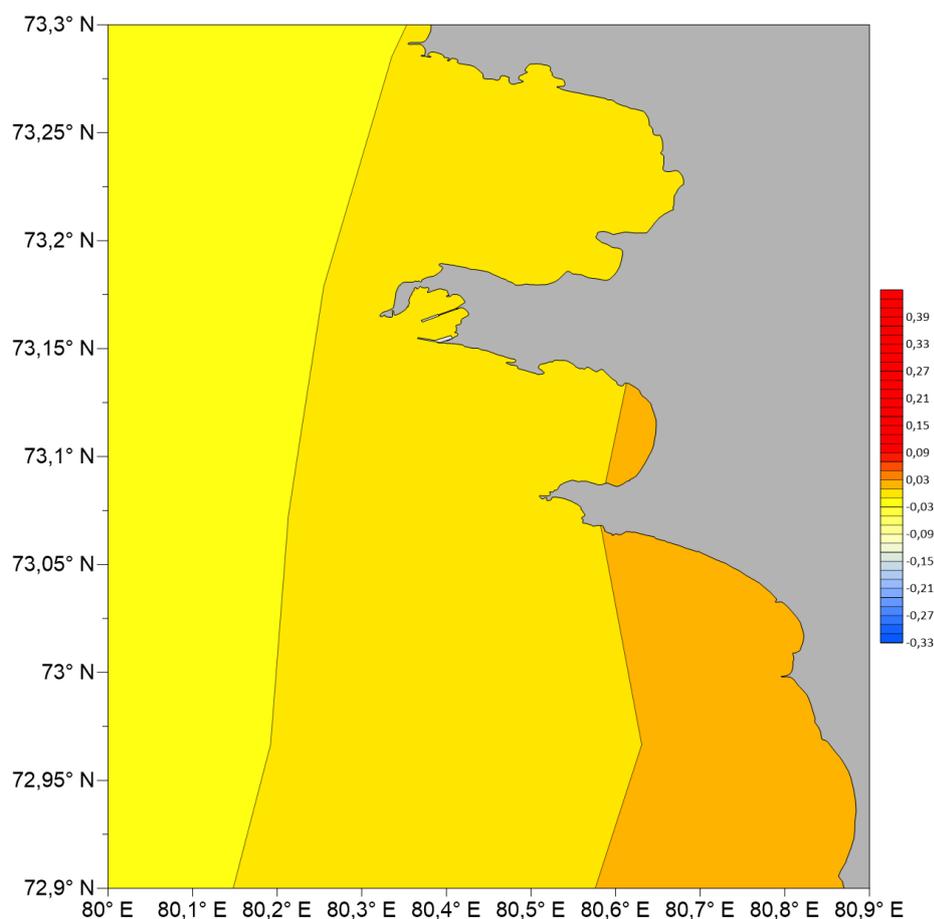


Рисунок 52 Распределение уровня воды в районе бухты Север Енисейского залива 15.10.2020 в 00:00

Анализ смоделированных полей уровня воды (ζ) показывает, что его колебания в районе исследования полностью определяются ветровым воздействием, а именно сгонно-нагонными явлениями. Изменчивость уровня напрямую коррелирует с направлением и силой ветра в рассмотренные моменты времени (рисунки 46-51).

Наиболее выраженные нагонные явления наблюдались 15 мая, 15 июля и 15 октября (рисунки 46, 48, 51). В эти дни под действием ветров с южной компонентой (южных и юго-западных) происходило скопление водных масс у побережья, что приводило к повышению уровня до +0.2... +0.3 м относительно среднего.

В противоположность этому, сгонное явление было зафиксировано 15 сентября (рисунок 50), когда северо-западный ветер отгонял воду от

берега, вызывая понижение уровня до -0.15 м. В остальные даты (15 июня и 15 августа) значительных колебаний уровня не наблюдалось, что связано либо со слабостью ветрового воздействия, либо с его направлением вдоль берега.

Таким образом, колебания уровня, изменяя фактическую глубину на мелководье, являются важным дополнительным фактором, влияющим на процессы трансформации и обрушения волн, что необходимо учитывать при анализе волнового режима.

3.4. Временная изменчивость

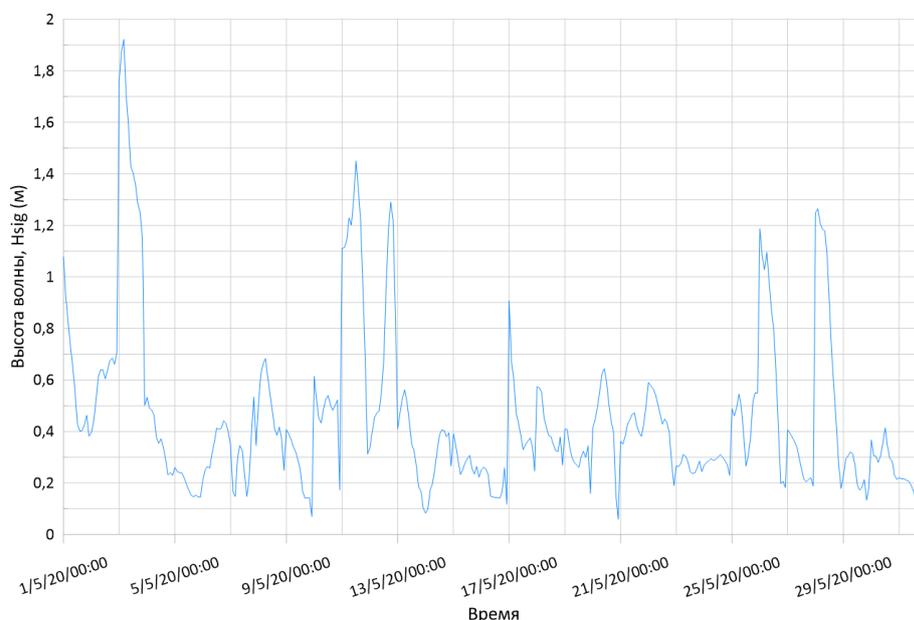


Рисунок 53 Временная изменчивость высоты волн H_{sig} в точке с координатами 73.15° с.ш. и 80.38° в.д. на входе бухты Север Енисейского залива в мае 2020 г.

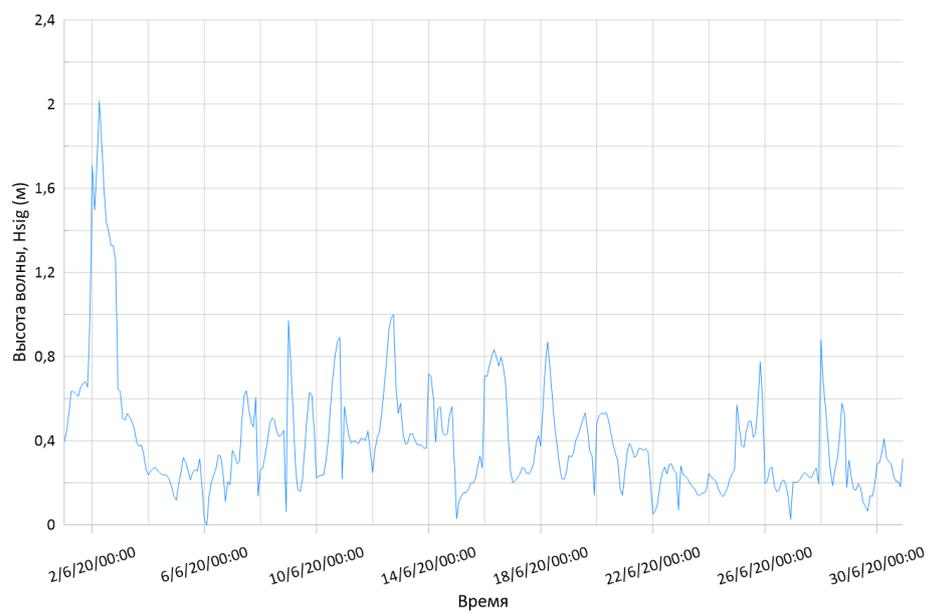


Рисунок 54 Временная изменчивость высоты волн H_{sig} в точке с координатами 73.15° с.ш. и 80.38° в.д. на входе бухты Север Енисейского залива в июне 2020 г.

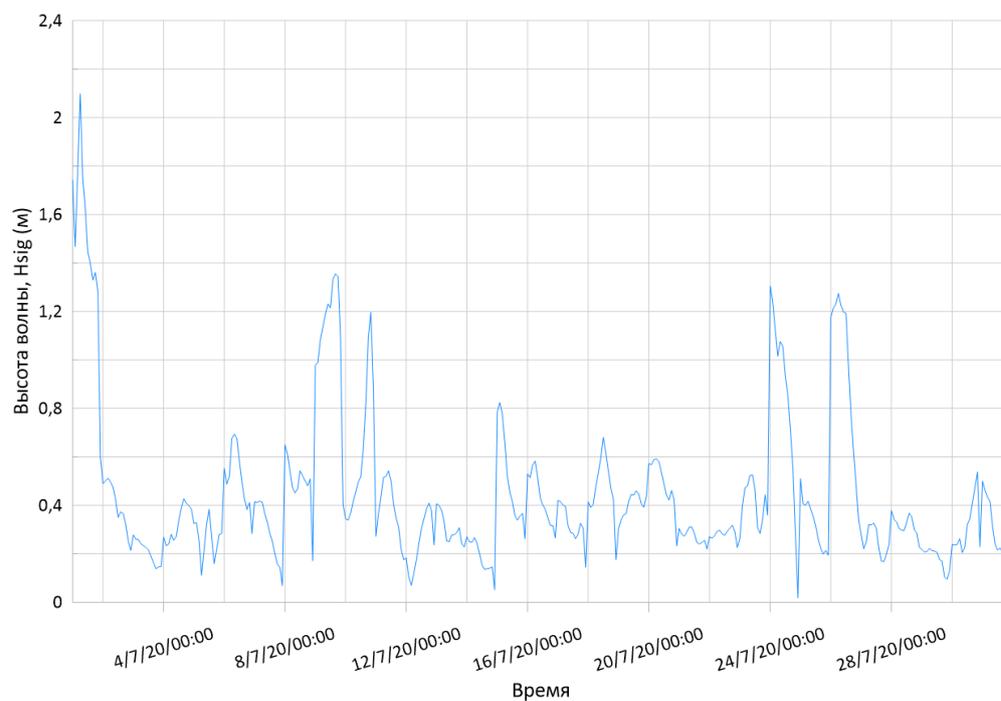


Рисунок 55 Временная изменчивость высоты волн H_{sig} в точке с координатами 73.15° с.ш. и 80.38° в.д. на входе бухты Север Енисейского залива в июле 2020 г.

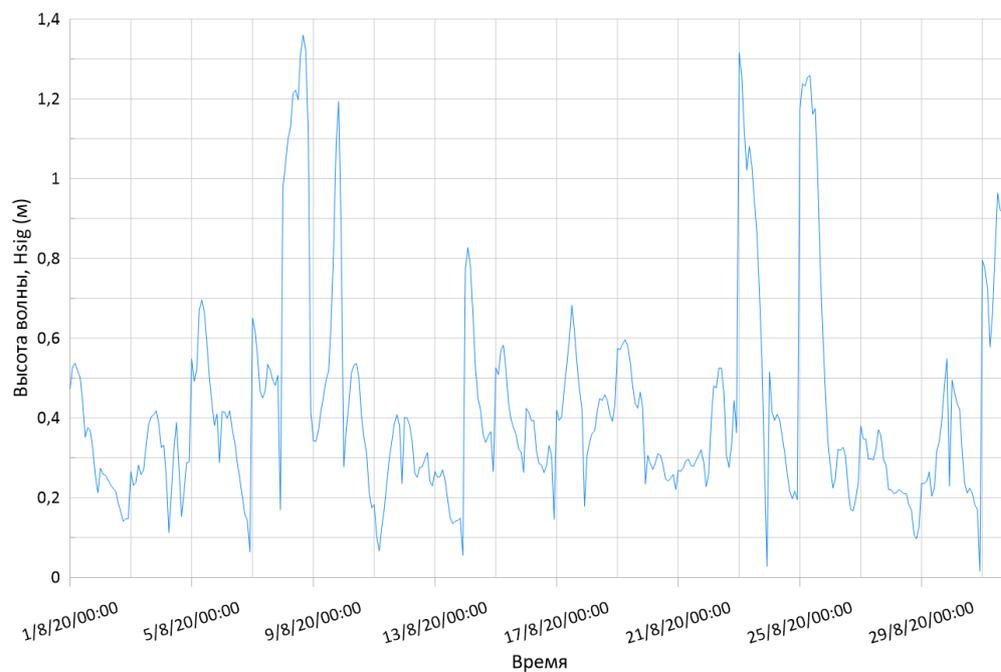


Рисунок 56 Временная изменчивость высоты волн H_{sig} в точке с координатами 73.15° с.ш. и 80.38° в.д. на входе бухты Север Енисейского залива в августе 2020г.

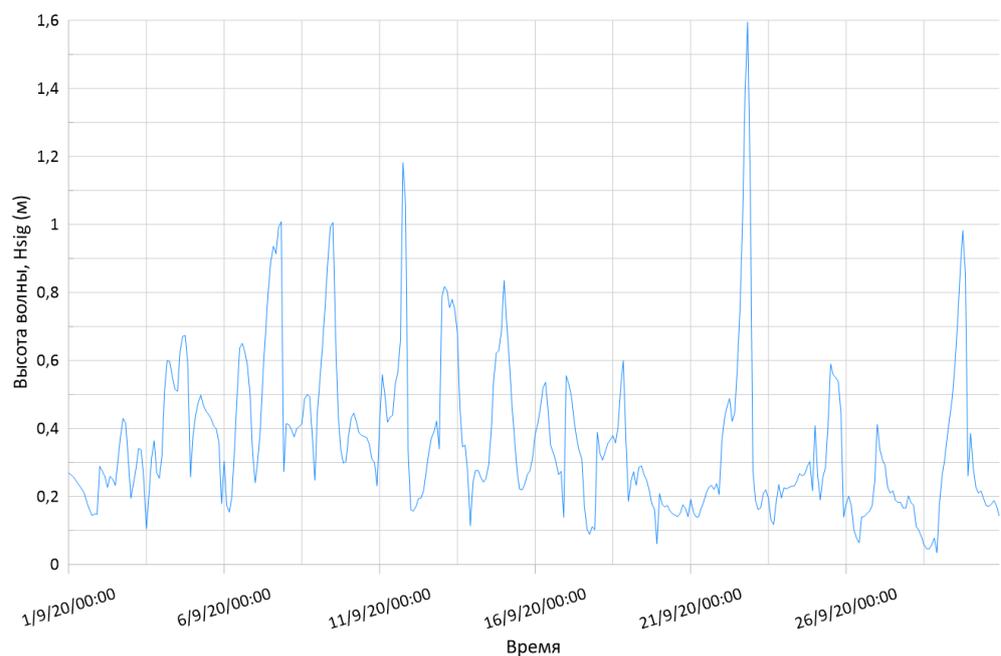


Рисунок 57 Временная изменчивость высоты волн H_{sig} в точке с координатами 73.15° с.ш. и 80.38° в.д. на входе бухты Север Енисейского залива в сентябре 2020 г.

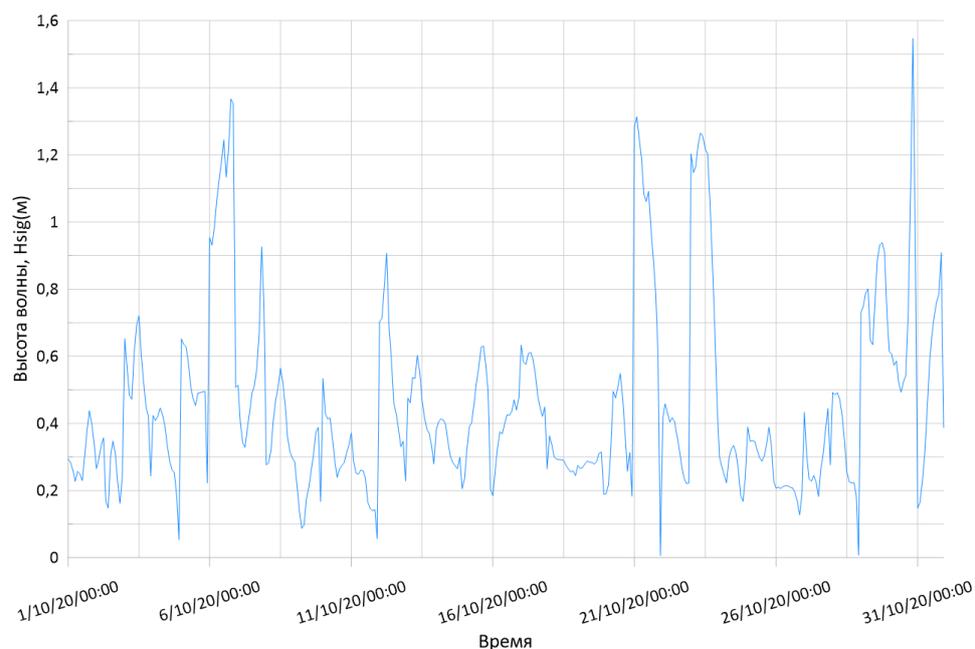


Рисунок 58 Временная изменчивость высоты волн H_{sig} в точке с координатами 73.15° с.ш. и 80.38° в.д. на входе бухты Север Енисейского залива в октябре 2020 г.

Для детального изучения динамики волнения был проведен анализ временных рядов значительной высоты волн (H_{sig}) в контрольной точке на входе в бухту Север (73.15° с.ш. и 80.38° в.д.). Графики, представленные на рисунках 52-57, демонстрируют, что волновой режим в течение всего безледового сезона характеризуется как крайне изменчивый. Длительные периоды относительно спокойного моря ($H_{sig} < 0.5$ м) регулярно прерываются короткими (1-2 суток) и резкими штормовыми событиями.

Наиболее экстремальные волновые условия за весь период наблюдений были зафиксированы в начале лета. В начале июня и июля наблюдались самые мощные штормы, во время которых значительная высота волн превышала 2.0 м. Также очень крупное волновое событие с высотой волн до 1.9 м произошло в начале мая. В конце сезона выделяется интенсивный, хотя и более короткий, шторм в конце сентября, с пиковой высотой волн до 1.6 м.

Анализ позволяет выявить и некоторые сезонные особенности. Начало лета (май-июль) характеризуется наиболее высокими, хотя и редкими, штормовыми пиками. Середина лета (август) отличается более частыми, но менее интенсивными событиями, где высота волн не превышала 1.4 м. Осенний период, особенно октябрь, демонстрирует рост общей волновой активности и частоты штормов, хотя и без достижения максимальных пиковых значений. Эта сложная временная структура является прямым отражением изменчивости синоптической обстановки и прохождения циклонов над акваторией Карского моря.

Заключение

Проведенный комплексный анализ формирования ветро-волнового режима на входе в бухту Север Енисейского залива за безледовый период 2020 года позволил установить, что формирование этих условий является сложным процессом, который определяется нелинейным взаимодействием атмосферного воздействия, региональной гидродинамики и локальной орографии.

Основным внешним фактором, поставляющим энергию в систему, является ветер. Однако его воздействие трансформируется в движение водных масс несколькими путями. Было установлено, что прямое дрейфовое течение, отклоненное силой Кориолиса, является лишь одним из возможных сценариев. Часто доминирующую роль играет крупномасштабное фоновое течение градиентного характера, направленное на юг. Локальный ветер может как усиливать этот поток, так и ослаблять его, действуя в противофазе, а в некоторых случаях его влияние оказывается второстепенным. Кроме того, взаимодействие этих потоков со сложной конфигурацией береговой линии и рельефом дна инициирует формирование устойчивых вихревых структур, которые кардинально перестраивают локальную циркуляцию.

В свою очередь, поле ветрового волнения напрямую зависит от интенсивности ветра: наиболее сильные штормы с высотой волн свыше 1.5–2.0 м четко коррелируют с периодами максимальной ветровой активности. Однако, сгенерированные в открытой части залива, волны испытывают значительную трансформацию при подходе к берегу. В результате взаимодействия с прибрежным мелководьем их длина и период уменьшаются, а крутизна растет, что приводит к диссипации энергии и обрушению.

Вследствие этого, на входе в бухту Север и особенно в ее акватории формируется особый волновой режим. Бухта выступает в роли защищенной от прямого волнового удара зоны, где высота, период и длина волн всегда значительно меньше, чем в открытой части Енисейского залива. Это исследование наглядно демонстрирует, что для адекватной оценки и прогнозирования ветро-волновых условий в районах со сложной морфологией необходимо применение численных моделей, учитывающих всю совокупность действующих сил — от синоптического масштаба до локальных особенностей рельефа.

Список использованной литературы

1. Аксёнов, Д. Е. Комплексное управление прибрежными зонами и морское планирование в Арктике / Д. Е. Аксёнов, О. В. Титова, К. А. Золотарев. – Москва : Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017. – 132 с. – ISBN 978-5-6040020-0-5.
2. Бабий, С. В. Ветровое волнение в Карском море по данным спутниковой альтиметрии / С. В. Бабий, А. В. Захваткин // Исследования Земли из космоса. – 2018. – № 2. – С. 15–24.
3. Волков, В. А. Ледовые условия на арктических морях по данным спутниковой альтиметрии / В. А. Волков, Т. А. Соустова. – Санкт-Петербург : ААНИИ, 2013. – 210 с. – ISBN 978-5-98364-054-7.
4. Вышегородцев, А. А. Промысловые рыбы Енисея : монография / А. А. Вышегородцев, В. А. Заделёнов. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2013. – 303 с. – ISBN 978-5-7638-2856-4.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IV. Карское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. И. П. Романова, В. К. Коротаева. – Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1996. – 342 с.
6. Добровольский, А. Д. Моря СССР / А. Д. Добровольский, Б. С. Залогин. – Москва : Изд-во МГУ, 1982. – 192 с.
7. Завьялов, П. О. Основы численного моделирования в задачах физической океанографии : учебное пособие / П. О. Завьялов, А. Г. Костяной. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2017. – 224 с. – ISBN 978-5-9221-1748-6.
8. Иванов, В. В. Гидрология устьевой области Енисея / В. В. Иванов, А. И. Осипов. – Санкт-Петербург : ААНИИ, 2001. – 287 с.
9. Иванов, В. В. Межгодовая изменчивость циклонической деятельности в Карском море и ее связь с региональными климатическими изменениями / В. В. Иванов, А. В. Кустов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2020. – Т. 66, № 3. – С. 253–271.

- 10.Маккавеев, П. Н. Новые данные по гидролого-гидрохимическому режиму Енисейского залива / П. Н. Маккавеев, А. А. Полухин, Ю. Р. Налбандов, П. В. Хлебопашев // Океанология. – 2015. – Т. 55, № 4. – С. 540–551.
- 11.Магрицкий, Д. Б. Системный анализ и моделирование гидрологических процессов в устьях рек : монография / Д. Б. Магрицкий. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2010. – 392 с. – ISBN 978-5-211-05917-2.
- 12.Михайлов, В. Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее / В. Н. Михайлов. – Москва : ГЕОС, 1997. – 413 с.
- 13.Михайлов, В. Н. Современные проблемы гидрологии устьевых областей рек Сибири : монография / В. Н. Михайлов, В. В. Иванов, Д. Б. Магрицкий. – Москва : ГЕОС, 2008. – 288 с. – ISBN 978-5-89118-426-3.
- 14.Полякова, Е. И. Арктические моря Евразии в позднем кайнозое / Е. И. Полякова, С. А. Шестакова, В. В. Кравчишина. – Москва : ГЕОС, 2013. – 201 с. – ISBN 978-5-89118-624-3.
- 15.Романов, И. П. Лед и суда. Ледовые условия плавания в Арктике / И. П. Романов. – Москва : Паулсен, 2014. – 256 с. – ISBN 978-5-98797-087-5.
- 16.Системные исследования в Арктике. Научный флот на трассе Севморпути / отв. ред. А. А. Саркисян. – Москва : Научный мир, 2017. – 488 с. – ISBN 978-5-91522-446-4.
- 17.Фролов, И. Е. Научные исследования в Арктике. Т. 3. Океанология / И. Е. Фролов, В. Г. Смирнов, З. М. Гудкович. – Санкт-Петербург : Наука, 2014. – 405 с. – ISBN 978-5-02-038334-9.
- 18.Шестакова, А. А. Литодинамика устьевой области Енисея в условиях современных климатических изменений : автореферат дис. ... кандидата географических наук : 25.00.28 / Шестакова Александра Андреевна. – Москва, 2011. – 24 с.
- 19.Booij, N. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation / N. Booij, R. C. Ris, L. H. Holthuijsen // Journal of

- Geophysical Research: Oceans. – 1999. – Vol. 104, No. C4. – P. 7649–7666. – DOI: 10.1049/jp.1999.04.oceans.v104.iC4.
20. Deltares. Delft3D-FLOW: User Manual. Version 3.15 / Deltares. – Delft, The Netherlands, 2020. – 758 p.
21. Hersbach, H. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, et al. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2020. – Vol. 146, No. 730. – P. 1999–2049. – DOI: 10.1002/qj.3803.
22. Lesser, G. R. Development and validation of a three-dimensional morphological model / G. R. Lesser, J. A. Roelvink, J. A. T. M. van Kester, G. S. Stelling // Coastal Engineering. – 2004. – Vol. 51, No. 8-9. – P. 883–915. – DOI: 10.1016/j.coastaleng.2004.07.014.
23. Арктический и антарктический научно-исследовательский институт : [официальный сайт]. – URL: <http://www.aari.ru> (дата обращения: 03.06.2025).
24. Водно-болотные угодья России. Том 1. Водно-болотные угодья международного значения. Бреховские острова (Внутренняя дельта Енисея) : [сайт]. – URL: <http://www.fesk.ru/wetlands/2.html> (дата обращения: 03.06.2025).
25. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) : [портал]. – URL: <http://www.esimo.ru/> (дата обращения: 03.06.2025).
26. Погода и Климат. Климат Диксона : [сайт]. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/20674.htm> (дата обращения: 03.06.2025).
27. Росгидромет. Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды : [официальный сайт]. – URL: <https://www.krasmeteo.ru/> (дата обращения: 03.06.2025).
28. ФГБУ «Главное управление Северного морского пути» : [официальный сайт]. – URL: <https://www.nsra.ru/> (дата обращения: 03.06.2025).

29. Федеральное агентство водных ресурсов. Государственный водный реестр : [сайт]. – URL: <https://textual.ru/gvr/> (дата обращения: 03.06.2025).
30. Энциклопедия «Вода России». Енисей : [сайт]. – URL: https://water-ru.ru/Водные_объекты/172/Енисей (дата обращения: 03.06.2025).