



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

**Кафедра Океанологии**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

**«ИЗМЕНЧИВОСТЬ КЛИМАТА ВДОЛЬ ТРАССЫ СЕВЕРНОГО  
МОРСКОГО ПУТИ»**

**Исполнитель:** \_\_\_\_\_ Петухова Екатерина Михайловна \_\_\_\_\_

**Научный руководитель:**

\_\_\_\_\_ доктор географических наук \_\_\_\_\_  
(ученая степень, ученое звание)

\_\_\_\_\_ Малинин Валерий Николаевич \_\_\_\_\_  
(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»**

**Заведующий кафедрой** \_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_ кандидат географических наук \_\_\_\_\_  
(ученая степень, ученое звание)  
\_\_\_\_\_ Хаймина Ольга Владимировна \_\_\_\_\_  
(фамилия, имя, отчество)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

г. Санкт-Петербург  
2022 г

## **Содержание**

Сокращения.....	3
Введение.....	4
1.Характеристика морей, входящих в состав Северного морского пути.....	9
1.1 Карское море.....	9
1.2 Море Лаптевых.....	12
1.3. Восточно-Сибирское море .....	12
1.4 Чукотское море.....	18
2. Методы исследования изменчивости климата вдоль трассы Северного морского пути. ....	21
2.1. Исходные данные .....	21
3. Изменчивость температуры воздуха морей СМП.....	24
4. Изменчивость площади морского льда. Взаимосвязь температуры воздуха и ледовитости.....	30
Заключение .....	38
Список используемых источников.....	40

## **Сокращения**

СМП – Северный морской путь

АСМП – Администрация Северного морского пути

ААНИИ – Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

СКО-среднее квадратическое отклонение

## Введение

### Северный морской путь

Северный морской путь (СМП) – это судоходный маршрут, который законодательство Российской Федерации определяет как путь проходящий от востока о. Новая Земля вдоль российского арктического побережья до Берингова пролива. Маршрут СМП проходит в пределах исключительной экономической зоны России (ИЭЗ). Общая протяженность Севморпути составляет до 3000 морских миль или около 5600 км. [1]

Под акваторией Северного морского пути понимают водное пространство, прилегающее к северному побережью Российской Федерации, охватывающее внутренние морские воды, территориальное море, прилежащую зону и исключительную экономическую зону России. С востока ограничивается линией разграничения морских пространств с США и меридианом мыса Желания до архипелага Новая Земля, восточной береговой линией архипелага Новая Земля (рис. 1.). [1]



Рис. 1. Траектория Северного пути

В настоящее время Северный морской путь является одной из основных морских магистралей в России и играет важную роль в экономики РФ.

### История освоения Северного морского пути

Начало освоения Северного морского пути было положено местными жителями прибрежной полосы Белого моря поморами в XI-XIII веках. На тот момент передвижения людей были ограничены прибрежной полосой, так как в их распоряжении были только лодка, каменный топор и гарпун. [2]

Впервые идея использования Северо-Восточного прохода (название Северного морского пути до начала XX в.) была выдвинута 1525 году русским дипломатом Дмитрием Герасимовым, который ссылался на плавания поморов. [3] Но более серьезное изучение СМП началось только век спустя.

В 1647 году казачий атаман Семён Дежнёв обошел Чукотский полуостров и совершил выход в Тихий океан. Тем самым он открыл пролив между Евразией и Северной Америкой (Беренгов пролив) и доказал, что Северо-Восточный проход может стать маршрутом между Атлантическим и Тихим океанами. Однако до появления паровых судов пройти по нему не удавалось. [4]

С 1733 г. по 1743 г. была проведена Великая Северная экспедиция под руководством Витуса Беренга, по итогам которой, Ломоносов Михаил Васильевич подготовил работу «Краткое описание разных путешествий по северным морям и показание возможного прохода Сибирским океаном в Восточную Индию». [4]

Характеристики Северного морского пути также изучались такими экспедициями как: высокоширотной экспедицией во главе с В. Я. Чичаговым, Северо-Восточной – И. Биллингса – Г. А. Сарычева, Усть-Янской и Колымской экспедицией под руководством П. Ф. Анжу и Ф. П. Врангеля, новоземельской экспедицией Ф. П. Литке, П. К. Пахтусова и А. К. Циволько. Результаты их исследований предопределил дальнейшее развитие СМП. [4]

Для иностранных исследователей Северный морской путь также представлял большой интерес. Первым среди европейцев в изучении Северо-Восточного прохода стал англичанин сэр Хью Уиллоуби в 1553 году. Из трех кораблей он сформировал экспедицию, но она закончилась трагедией.

Наиболее значимые экспедиции иностранцами совершались в конце XIX начале XX веков. Среди них экспедиция шведского исследователя Эрика Норденшельда . На китобойном парусно-паровом барке «Вега» в 1878-1879 гг. ему в первые удалось пройти Северный морской путь.

Также внимания заслуживают путешествие под руководством американца Джорджа У. Де Лонга на яхте «Жанетта» (1879-1881 гг.), трехлетняя экспедиция норвежского исследователя Фритьофа Нансена на деревянной парусно-моторной шхуне «Фрам» (1893-1896 гг.). С 1918 года по 2020 на шхуне «Мод» норвежцем Руалем Амундсенем было совершено полное прохождение Северного морского пути. [4]

В России в начале XX века также продолжалось активное исследование СМП. В 1912 году в путь отправились две экспедиции: лейтенант Георгий Брусилов на паровой шхуне «Святая Анна» и арктический исследователь Владимир Русанов на зверобойном судне «Геркулес».[2]

В 1909 году на Невском судостроительном заводе были построены ледокольные пароходы «Таймыр» и «Вайгач». И уже 1914 году на них была проведена гидрографическая экспедиция под руководством Бориса Вилькицкого , во время которой был открыт остров Северная Земля.[2]

23 апреля 1919 года Севморпуть впервые получил юридический статус— был создан Комитет Северного морского пути[2]

С 1921 года началось проведение экспедиций по Карскому морю, а с 1923 года – по Восточно-Сибирскому, что подготовило почву для дальнейшего использования всей трассы СМП. [4]

В первый раз по всему Северному морскому пути советским мореплавателям удалось пройти в 1932 году на ледокольном пароходе «Александр Сибиряков» под командованием Отто Шмидта. Экипаж прошел путь из Архангельска до Берингова пролива за два месяца и три дня. Эта экспедиция доказала возможность использования Севморпути. [4]

После окончания успешной экспедиции в 1932 году было создано Главное управление СМП (Главсевморпуть), которое возглавил Отто Шмидт. Главсевморпуть начал активное развитие СМП. [3]

В 30–40-е гг. XX столетия началось активное строительство морских арктических портов: Игарка, Диксон, Певек, Провидения и др. А экспедиции на «Челюскине» (1933–34), возглавленная Отто Шмидтом, и «Литке» (1934) показали возможность провоза грузов по трассе СМП. [4]

Также значительную роль в освоении Севморпути сыграли следующие экспедиции: гидрографическая по изучению обстановки трассы и для составления навигационных карт и лоций высокоширотная на «Садко» (1935), дрейф «Георгия Седова» (1937–40), первая науч. станция «Северный полюс» (1937–38) во главе с И. Д. Папаниным, ледовые патрули (с 1938), послевоенные экспедиции – на ледоколе «Северный полюс» в северо-восточные моря (1946), на «Литке» в Карское море (1948). [4]

С 1950 во льдах Арктики начали функционировать дрейфующие научные станции «Северный полюс» («СП»). [3]

В 1970 году была создана при Министерстве морского флота Администрация Северного морского пути. Основными целями АСМП являлись

создания структуры арктического судоходства , обеспечение безопасности и экологический надзор.[3]

После распада СССР система, созданная ранее, была разрушена. Однако уже в начале XXI века освоение и использование СМП возобновилось и в настоящее время развитие трассы Севморпути активно продолжается.

На освоение и эксплуатацию СМП влияет климат. В настоящее время происходит потепление климата в арктической зоне. Это приводит к освобождению Севморпути ото льда в зависимости от геофизических факторов.

Необходимость исследования влияния климата на характеристики Северного морского пути определяется экономическими факторами.

Целью работы является исследование климата вдоль трассы Северного морского пути.

Для достижения цели необходимо:

1. Описать географические характеристики морей Северного морского пути (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское).
2. Оценить изменчивость температуры воздуха для морей СМП.
3. Провести оценку площади морского льда в исследуемых морях.
4. Исследовать взаимосвязи изменения температуры воздуха и ледовитости морей Севморпути.

# 1. Характеристика морей, входящих в состав Северного морского пути

## 1.1 Карское море



Рис. 2. Акватория Карского моря

Физико-географические характеристики.

Карское море является самым западным морем Северного морского пути. Его относят к типу материковых окраинных морей. Находится между параллелями  $81^{\circ}6'$  и  $66^{\circ}0'$  с. ш. и между меридианами  $55^{\circ}2'$  и  $104^{\circ}1'$  в. д. [5]

На западе граница моря проходит от м. Кользат до м. Желания, далее по восточным берегам Новой земли, по западной границе пролива Карские Ворота от м. Кусов Нос до м. Рогатый, восточному берегу о. Вайгач и по западной границе пролива Югорский Шар от м. Кользат до м. Арктический на о. Комсомолец (Северная Земля). [5]

Восточная граница моря проходит по западному берегу островов архипелага Северная Земля и восточным границам проливов Красной Армии,

Шокальского и Вилькицкого, а южная граница — по материковому берегу от м. Белый Нос до м. Прончищева. [5]

Площадь моря составляет приблизительно 883 тыс. км<sup>2</sup>, объем — 98 тыс. км<sup>3</sup>, средняя глубина — 111 м, наибольшая глубина — 600 м. [5]

#### Климатические особенности.

Большое влияние на климат в Карском море оказывает его расположение. Так как море находится в высоких широтах Арктики и является частью Северного Ледовитого океана, оно имеет полярный морской климат. Однако благодаря близости Атлантического океана климат моря смягчается. Из-за большой протяженности в юго-восточной и северо-западной частях моря различные климатические условия. [5]

Кроме расположения на климат над акваторией Карского моря влияет не только расположение, но и интенсивность и взаимодействие циклонов и антициклонов. С наступлением осени и зимы формируется и устанавливается Сибирский антициклон, усиливается влияние Полярного максимума, а на море распространяется действие ложбины Исландского минимума. [5]

В зимнее время в большей части моря преобладают ветры южного, юго-западного и юго-восточных направлений. В северо-восточной части Карского моря в основном господствуют ветры северных румбов. Средняя скорость ветра составляет 7—8 м/с. Для западной части Карского моря характерны самое большое количество штормовых явлений. Прибрежные воды архипелага Новая Земля часто бывают подвержены местному ураганному ветру — новоземельская бора. Средняя температура воздуха в марте на м. Челюскина, как правило,  $-28,6^{\circ}$ , на м. Желания  $-20^{\circ}\text{C}$ , а минимальные значения температуры воздуха в море могут достигнуть  $-45$ — $50^{\circ}\text{C}$ . [5]

Весной Сибирский антициклон разрушается, а Полярный смещается к северу. Поэтому в Карском море в это время преобладают слабые (не более 5-6

м/с) и неустойчивые по направлению ветры. В мае средняя температура воздуха составляет приблизительно  $-7^{\circ}$  на западной части моря и  $-9^{\circ}$  на восточной. [5]

Так как летом над акваторией моря образуется местная область повышенного давления, в море преобладают ветра северного направления со скоростями 4—5 м/с. Наибольшая температура воздуха в Карском море наблюдается в июле и в среднем равна  $5—6^{\circ}$  в западной части моря и  $1—2^{\circ}$  на востоке и северо-востоке. [5]

### Ледовый режим

Из-за сурового климата акватория Карского моря полностью покрывается льдом в осенне-зимний период и существует в течении всего года. В северной части моря процесс льдообразования начинается в сентябре, а в южной—в октябре. [5]

В прибрежной части моря находится неравномерно развитый припай. В северо-восточной части наблюдается моря неподвижный сплоченный лед. Взлом припая наблюдается летом. После взлома припая образуются ледяные поля. [5]

После зоны неподвижного льда находится район заприпайных полыней. На юго-западе Карского моря располагаются Амдерминская и Ямальская полыньи, а в центральной части моря — Обь-Енисейская. [5]

В открытой части морской акватории преобладают однолетние дрейфующие льды, максимальная толщина которых составляет 1,5—2,0 м. На юго-западе находится Новоземельский ледяной массив, который летом полностью разрушается на месте. Северная часть Карского моря покрыта льдом постоянно. [5]

## 1.2 Море Лаптевых



Рис. 3. Акватория море Лаптевых

### Физико-географические характеристики

Относится к типу материковых окраинных морей. Лежит между параллелями  $81^{\circ}16'$  и  $70^{\circ}42'$  с. ш. и меридианами  $95^{\circ}44'$  и  $143^{\circ}30'$  в. д. [5]

Западная граница моря проходит по восточным берегам островов архипелага Северная Земля от м. Арктический (о. Комсомолец), затем через пролив Красной Армии до м. Анучина, через пролив Шокальского до м. Песчаный на о. Большевик и по его восточному берегу до м. Вайгач, затем по восточной границе пролива Вилькицкого и далее по материковому берегу до вершины Хатангского залива. [5]

Северная граница моря проходит от м. Арктический до точки пересечения меридиана северной оконечности о. Котельный ( $139^{\circ}$  в. д.). [5]

Восточная граница от западного берега о. Котельный, далее по западной границе пролива Санникова, огибает западные берега островов Большой и Малый Ляховские и затем идет по западной границе пролива Дмитрия Лаптева. [5]

Южная граница моря проходит по материковому берегу от м. Святой Нос до вершины Хатангского залива. [5]

В этих границах море лежит между параллелями  $81^{\circ}16'$  и  $70^{\circ}42'$  с. ш. и меридианами  $95^{\circ}44'$  и  $143^{\circ}30'$  в. д. [5]

Площадь моря Лаптевых составляет — 662 тыс. км<sup>2</sup>, объем— 353 тыс. км<sup>3</sup>, средняя глубина — 533 м, наибольшая глубина— 3385 м. [5]

#### Климатические особенности

Море Лаптевых имеет континентальный тип климата. Континентальность климата моря выражается в высокой годовой амплитуде температуры воздуха. Из-за существенной протяженности моря с юго-запада на северо-восток климат в разных частях моря различается. [5]

В зимний период на море Лаптевых влияет три крупные барические системы: Сибирского и Полярный антициклоны, а также Исландский циклон. Зимой над акваторией моря преобладают ветра южного и юго-западного направления, скорость которых в среднем около 8 м/с. Температура воздуха над морем в январе в среднем достигает  $-26—29^{\circ}$ . [5]

Весной барическая обстановка аналогичная зимней, но имеет более слабое влияние. В весенний период преобладают ветры южного и северного направлений. Температура воздуха повышается. [5]

Летом Сибирский антициклон отсутствует, а Полярный максимум оказывает достаточно слабое влияние. Преобладают ветры северных румбов дующих со скоростью 3—4 м/с. Температура воздуха достигает максимального значения в августе, в центральной части моря Лаптевых она повышается до  $+1—5^{\circ}$ . [5]

## Ледовый режим

Процесс образования льда начинается в конце сентября, таяние льда начинается в июне-июле. Зимой в восточной части акватории моря Лаптевых преобладает достаточно большой по площади припай толщиной до 2 м, который занимает около 30 % площади моря. В северном направлении от припая наблюдаются пространства полыней и молодого льда. Вдоль восточного берега Таймыра, в море спускается отрог океанического Таймырского ледяного массива, в котором преобладают многолетние льды. [5]

### 1.3. Восточно-Сибирское море



Рис. 4. Акватория Восточно-Сибирского моря

#### Физико-географические характеристики

Восточно-Сибирское море омывает берега Восточной Сибири. Море относится к типу материковых окраинных морей. [5]

Его западная граница проходит от северной оконечности до северной оконечности этого острова о. Котельный, затем по его западному берегу и далее идет вдоль восточной границы моря Лаптевых. [5]

Северная граница проходит по краю материковой отмели от точки с координатами  $79^{\circ}$  с. ш.,  $139^{\circ}$  в. д. до точки с координатами  $76^{\circ}$  с. ш.,  $180^{\circ}$  в. д. [5]

Восточная граница — от точки с координатами  $76^{\circ}$  с. ш.,  $180^{\circ}$  в. по меридиану  $180^{\circ}$  до о. Врангеля, затем по его северо-западному берегу до м. Блоссом и далее до м. Якан на материке. [5]

Южная граница проходит по материковому берегу от м. Якан до м. Святой Нос (западная граница пролива Дмитрия Лаптева и Санникова). [5]

Восточно-Сибирское море имеет следующие размеры: площадь 913 тыс. км<sup>2</sup>, объем 49 тыс. км<sup>3</sup>, средняя глубина 54 м, наибольшая глубина 915 м. [5]

## Климатические особенности

Зимой в основном на климатические условия в Восточно-Сибирском море влияет отрог Сибирского максимума. Над морской акваторией дуют ветры в основном южного и юго-западного румбов, приносящие холодный воздух с материка, скорость которых в среднем составляет 6—7 м/с. Среднемесячная температура воздуха в январе достигает  $-28$ — $-30^{\circ}$ . Для зимы характерна спокойная ясная погода. В западной части моря из-за господства Атлантических циклонов наблюдается усиление ветра и некоторое потепление. В юго-восточной части преобладают Тихоокеанские циклоны, которые приносят холодный континентальный воздух, поэтому наблюдается усиление ветра, облачности и частые метели. На гористых участках побережья образуется местный ветер— фена, который достигает штормовой силы, несет с собой некоторое повышение температуры и уменьшение влажности воздуха. [5]

В летний период давление над Восточно-Сибирским морем повышено, а над континентом понижено, поэтому преобладают ветры северных направлений, которые достигают скорости в среднем 6—7 м/с. К концу лета в западной части Восточно-Сибирского моря ветер дует со скоростью 10—15 м/с. Юго-восточная часть моря значительно спокойнее. На севере акватории моря температура в июле в среднем достигает  $0$ — $+1^{\circ}$ , в прибрежной зоне  $+2$ — $+3^{\circ}$ . В летнее время над Восточно-Сибирским морем стоит преимущественно пасмурная погода с мелким морозящим дождем. Иногда наблюдается мокрый снег. [5]

## Ледовый режим

Как правило, акватория Восточно-Сибирского моря полностью покрыта льдом с октября по июль. В это время преобладает принос льдов из Центрального Арктического бассейна в море. Характерная особенность льдов Восточно-Сибирского моря — значительное развитие припая зимой. Припай занимает значительную площадь в западной части моря, а на востоке — узкую

полосу у побережья. На западе моря полоса припая достигает 400—500 км ширины, в центральных районах — 250—300 км и к востоку от м. Шелагского — 30—40 км. Толщина припая составляет 2 м. За припаем располагаются дрейфующие льды в виде это однолетнего и двухлетнего льда толщиной 2—3 м. В северной части моря встречается многолетний арктический лед. [5]

Летом после вскрытия припая положение льда изменяется. Льды всегда встречаются к северу от полосы о. Врангеля — Новосибирские острова. В западной части акватории моря формируется Новосибирский ледяной массив, состоящий из однолетних льдов. Восточная часть моря занята отрогом Айонского океанического ледяного массива, который в значительной мере образует тяжелые многолетние льды. [5]

## 1.4 Чукотское море



Рис. 5 Акватория Чукотского моря

### Физико-географические характеристики

Чукотское море является крайним восточным морем Северного морского пути. Относится к типу материковых окраинных морей. Занимает пространство между параллелями  $76^{\circ}$  и  $66^{\circ}$  с. ш. и меридианами  $180^{\circ}$  в. д. и  $156^{\circ}$  з. д.

Западная граница Чукотского моря проходит от точки пересечения меридиана  $180^{\circ}$  с краем материковой отмели ( $76^{\circ}$  с. ш.,  $180^{\circ}$  в. д.) по меридиану  $180^{\circ}$  до о. Врангеля и далее вдоль восточной границы Восточно-Сибирского моря.

Северная граница проходит от точки с координатами  $72^{\circ}$  с. ш.,  $156^{\circ}$  з. д. до м. Барроу на Аляске, далее по Материковому берегу до южного входного мыса бухты Шишмарева (п-ов Сьюард).

Южная граница Чукотского моря проходит по северной границе Берингова пролива от южного входного мыса бухты Шишмарева до м. Уникан (Чукотский полуостров) и далее по материковому берегу до м. Якан.

К Чукотскому морю относится пролив Лонга, западная граница которого проходит от м. Блоссом до м. Якан. Восточная граница пролива идет от м. Пиллар (о. Врангеля) до м. Шмидта.

Площадь Чукотского моря составляет 595 тыс. км<sup>2</sup>, его объем –42 тыс. км<sup>3</sup>, средняя глубина –71 м, наибольшая глубина –1256 м.

### Климатические особенности

В осенне-зимний период на акваторию Чукотского моря оказывают Сибирский и Полярный антициклоны и Алеутский циклон. Связи с этим направления ветров имеют неустойчивый характер. Средняя скорость ветра в зимний период составляет 6—8 м/с. Температура воздуха осенью в октябре на м. Шмидта и о. Врангеля уже достигает –8°, с ноября она понижается, также меняется направление ветра на северо-западное. В феврале барическая система изменяется, поэтому в северной части моря в основном наблюдаются северные и северо-восточные ветры, а в южной — северные и северо-западные. Скорость ветра в среднем равна 5—6 м/с.

Температура воздуха в феврале в среднем составляет в Уэлене –28°, на о. Врангеля –25° и на м. Шмидта –28°. Зима характеризуется холодной пасмурной погодой с порывистым ветром, которая иногда нарушается затоками теплого воздуха с Берингова моря.

Весной в южной части Чукотского моря преобладает пониженное давление. Преобладают ветры южных румбов, дующих со скоростью 3—4 м/с. Температура воздуха в апреле равна в среднем –12° в Уэлене и –17° на о. Врангеля.

Летом над морским пространством преобладает повышенное давление. На юге Чукотского моря дуют южные и юго-восточные ветры, на севере—северные и северо-восточные со скоростью 4—5 м/с.

Среднемесячная температура в июле составляет в среднем равна в Уэлене +6°, на о. Врангеля +2,5°, на м. Шмидта +3,5.

#### Ледовый режим

Зимой прибрежная часть моря покрывается неподвижным льдом, а далее — плавучим. Припай сосредоточен в узкой прибрежной полосе и в бухтах и заливах. Ширина припая не превышает 10—20 км. За припаем располагаются одно- и двухлетние ледовые поля, толщина которых составляет 150—180 см.

Летом кромка льда отходит в северную часть моря. В море образуются Чукотский и Врангелевский ледяные массивы. С августа по октябрь на акватории Чукотского моря наблюдается минимальное количество льда. в конце сентября начинается образование молодого льда.

## 2. Методы исследования изменчивости климата вдоль трассы Северного морского пути.

### 2.1. Исходные данные

Для исследования климатических изменений вдоль трассы Северного морского пути были выбраны среднемесячные данные о температуре и площади льда для четырех морей: Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского.

Для формирования рядов температуры были использованы данные среднемесячной температуры воздуха в период с января 1970 г. по декабрь 2020 г. на четырех станциях: Диксон (Карское море), Тикси (море Лаптевых), Амбарчик (Восточно-Сибирское море), Узлен (Чукотское море), выбранные с сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Координаты станций, выбранных для исследования, представлены в таблице 2.1.

Таблица. 2.1. Географические координаты исследуемых точек

Название морей	Карское	Лаптевых	Восточно-Сибирское	Чукотское
Название станций	Диксон	Тикси	Амбарчик	Узлен
Широта (° с. ш.)	73.51361084	71.58000183	69.62000275	66.1666641
Долгота (° в. д.)	80.40638733	128.9199982	162.3000031	190.1699982

Для оценки площади льда покрывающего моря Арктики, через которые походит СМП (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское), использовались среднемесячные данные научно-исследовательского института Арктики и Антарктики за сентябрь с 1980 по 2021 гг.

## 2.2. Статистические методы исследования

Для анализа изменчивости температуры воздуха и ледовитости исследуемых морей были использованы следующие статистические методы анализа: оценка среднего арифметического, дисперсии, стандартного квадратического отклонения, тренда. Для оценки взаимосвязи температуры воздуха и площади морского льда был применен корреляционный анализ

Далее приведено более подробное описание используемых методов.

Среднее арифметическое, дисперсия, стандартное отклонение

Среднее арифметическое значение ( $\bar{x}$ ) определяет центр тяжести (распределения) числового ряда и вычисляется по формуле:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n},$$

где n-длина ряда. [6]

Дисперсия (D) и связанное с ней стандартное (или среднее квадратическое) отклонение ( $\sigma$ ) характеризуют среднее рассеяние значений ряда от среднего арифметического значения.

Рассчитываются по следующим формулам соответственно:

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

Тренд временного ряда

Тренд показывает наличие во временной ряду исследуемой характеристики длиннопериодного колебания с периодом, который значительно превышает длину выборки.

Уравнение линейного тренда имеет следующий вид:

$$y = a_1 t + a_0 + \varepsilon,$$

где y-зависимая переменная, t-время (независимая переменная)  $a_1$ - величина тренда,  $a_0$ -свободный член,  $\varepsilon$ -отклонения от прямой. [7]

## Корреляционный анализ

Корреляционный анализ производится на основе оценки коэффициента корреляции ( $r$ ), который является безразмерной параметрической характеристикой. Коэффициент корреляции определяет степень линейной взаимосвязи двух случайных величин  $x$  и  $y$  и рассчитывается по следующей формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n\sigma_x\sigma_y},$$

где  $x$  и  $y$  - значения первой и второй переменных соответственно;  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  - средние значения первой и второй переменных соответственно;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  - стандартные отклонения первой и второй переменных соответственно;  $n$  - длина рядов первой и второй переменных. [6]

Для оценки средних квадратических погрешностей ( $\sigma_r$ ) коэффициентов корреляции используется следующая формула:

$$\sigma_r = \frac{(1-r)^2}{n^{1/2}}.$$

Для оценки генерального коэффициента корреляции строятся доверительные интервалы на основе  $t$ -статистики Стьюдента:

$$r - t_{кр} \sigma_r < r < r + t_{кр} \sigma_r,$$

где  $t_{кр}$  - критерий Стьюдента при уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы  $\nu = n - 2$ . [6]

### 3. Изменчивость температуры воздуха морей СМП

Для оценки изменчивости климата по трассе СМП были проанализированы ряды изменения температуры с 1970 по 2020 год, осредненные по двенадцати месяцам за каждый год для Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей. Они представлены соответственно на рисунках 6-9.

Поскольку среди задач работы была задача оценки площади льда в сентябре месяце для периода 1980 по 2020 гг., поэтому был приведен анализ изменчивости температуры воздуха по годам в морях СМП, осредненной за июнь-сентябрь (рис. 10-13 соответственно). Это связано с тем, что поток тепла в летний период максимальный.

Для оценки изменчивости характеристик температуры рассчитаны её средние квадратические отклонения (СКО) по десяти годам со скользящим средним через пять лет, которые представлены на рисунке 14 и таблице 2.

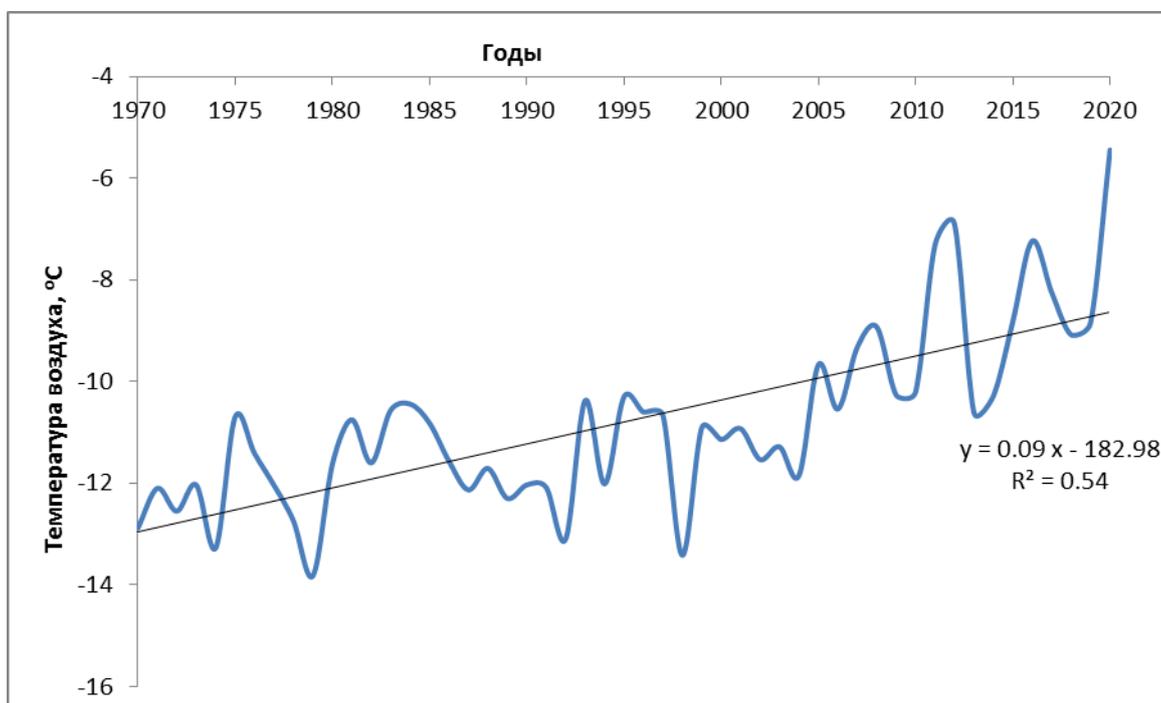


Рис. 6. Ход среднегодовой температуры воздуха в Карском море за период с 1970 по 2020 гг. и линейный тренд её изменения

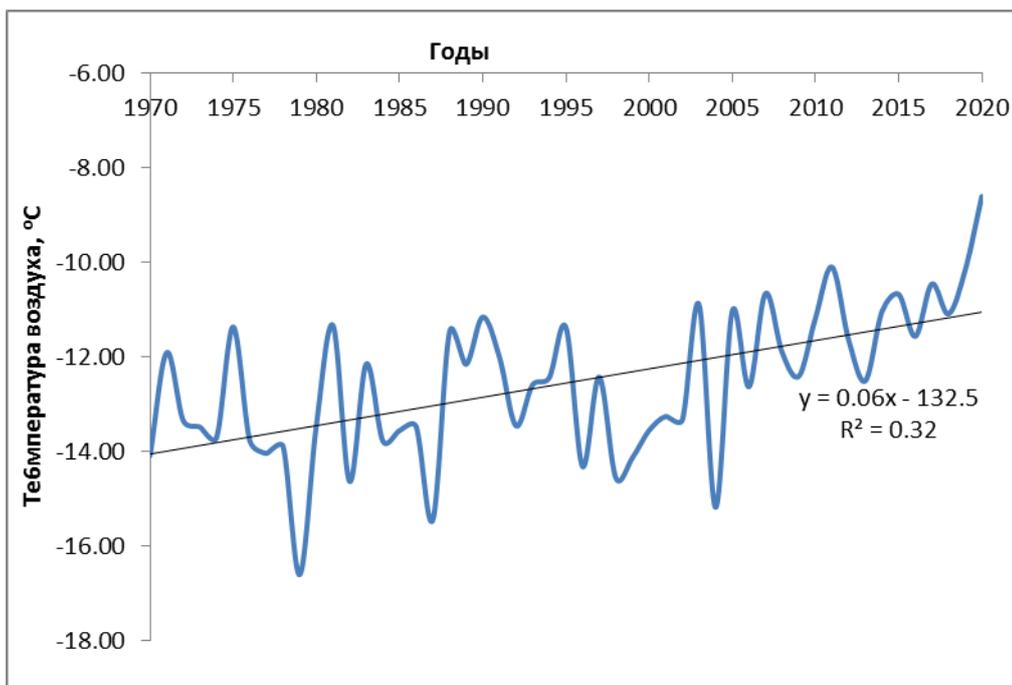


Рис. 7. Ход среднегодовой температуры воздуха в море Лаптевых за период с 1970 по 2020 гг. и линейный тренд её изменения

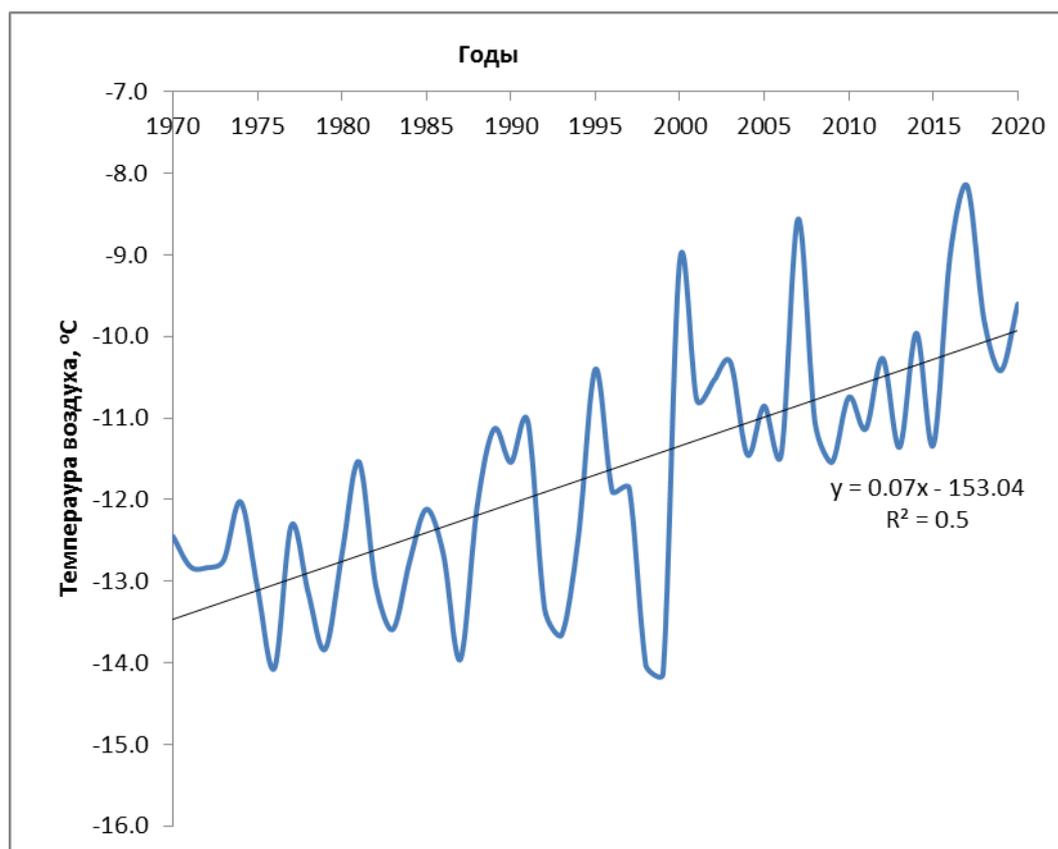


Рис. 8. Ход среднегодовой температуры воздуха в Восточно-Сибирском море за период с 1970 по 2020 гг. и линейный тренд её изменения

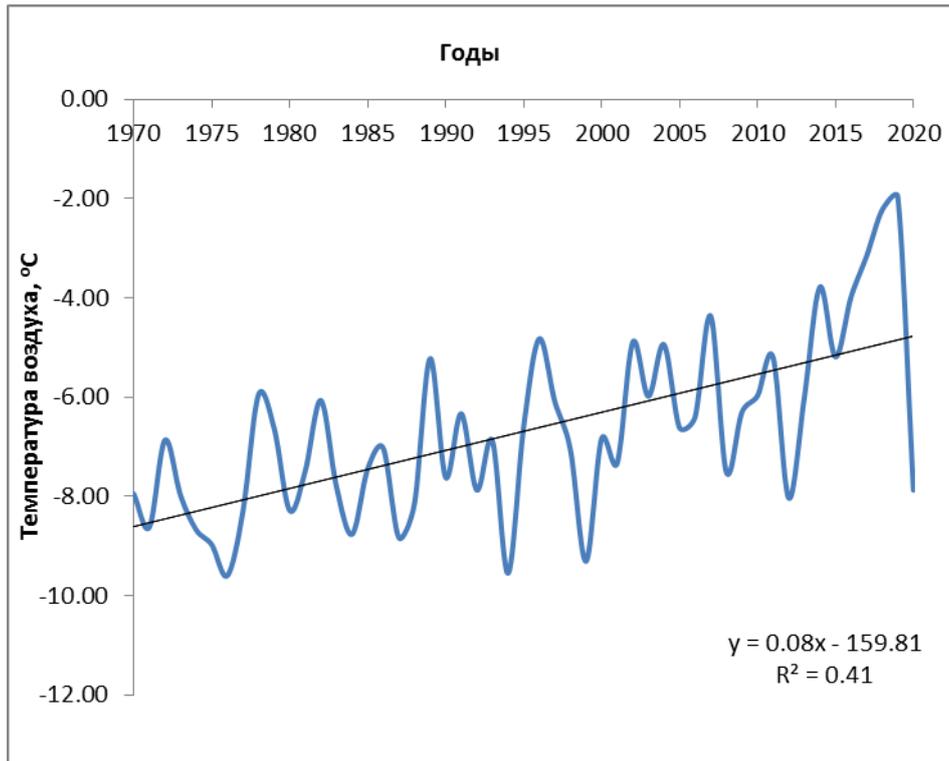


Рис. 9.Ход среднегодовой температуры воздуха в Чукотском море за период с 1970 по 2020 гг. и линейный тренд её изменения

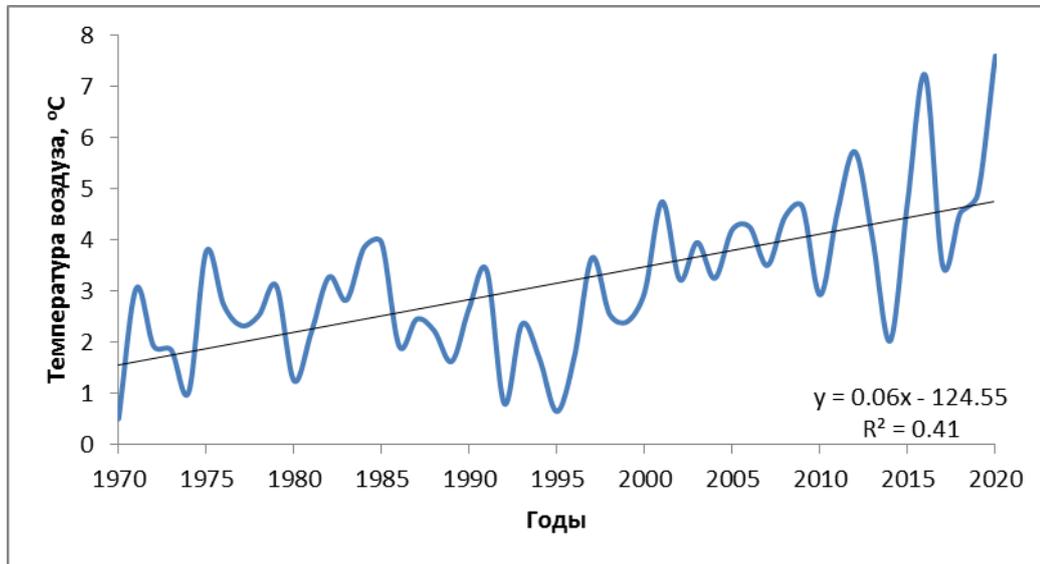


Рис. 10. Изменение температуры воздуха, осредненной за 4 месяца, с 1970 по 2020 гг. в Карском море

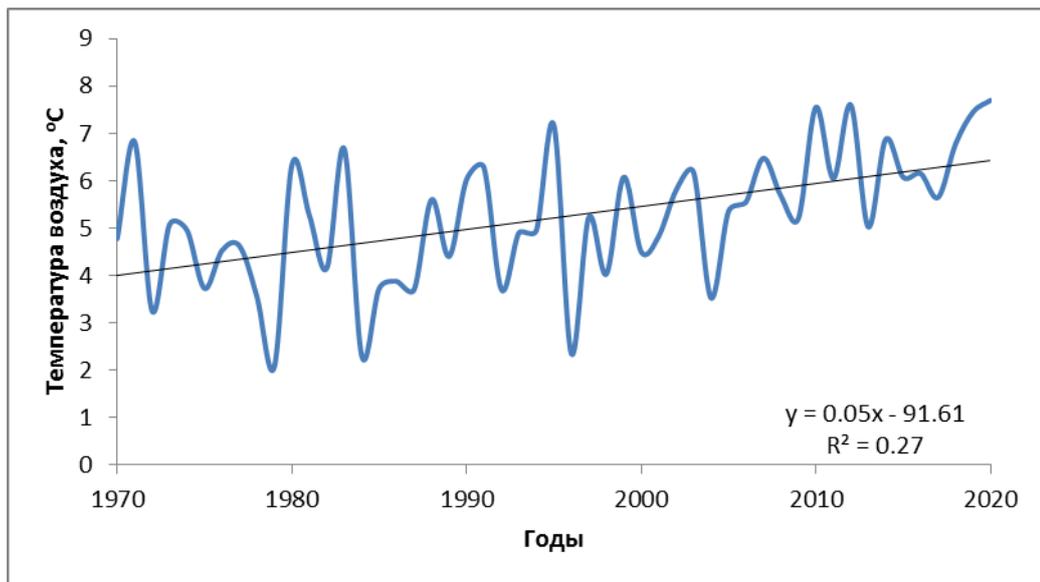


Рис. 11. Изменение температуры воздуха, осредненной за 4 месяца, с 1970 по 2020 гг в море Лаптевых

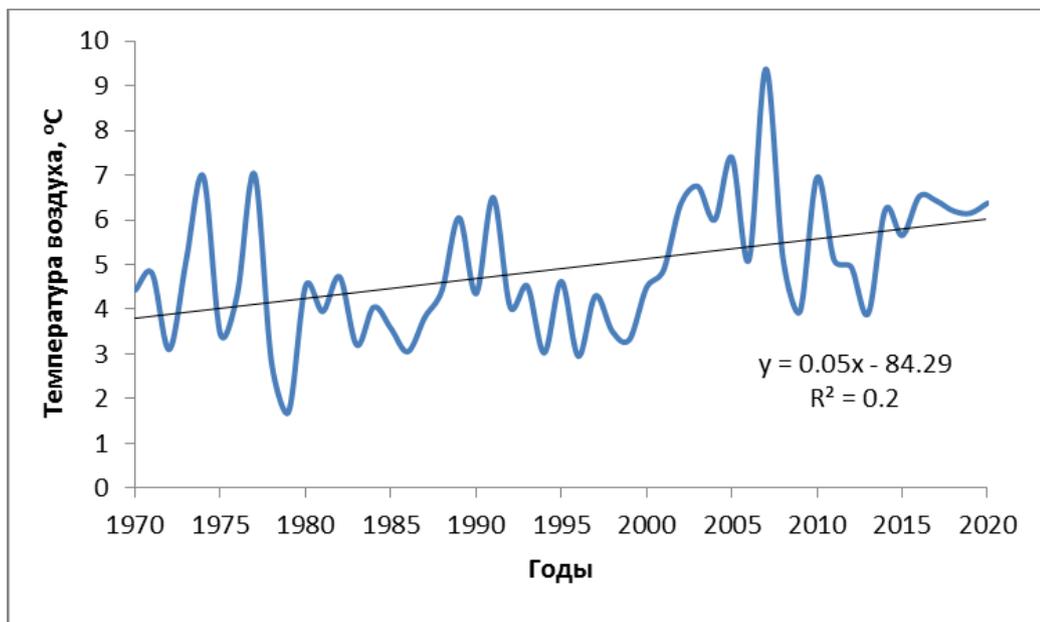


Рис. 12. Изменение температуры воздуха, осредненной за 4 месяца, с 1970 по 2020 гг в Восточно-Сибирском море

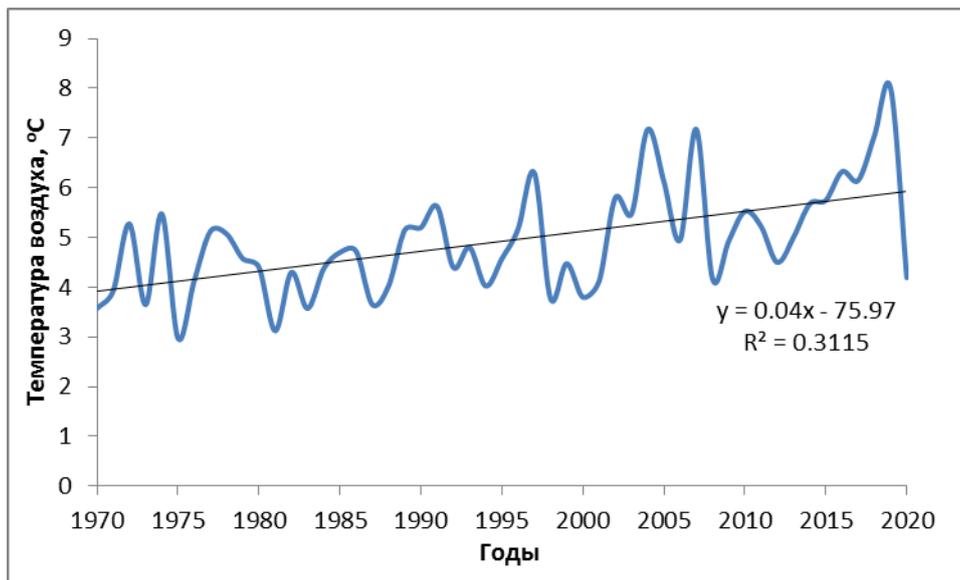


Рис. 13. Изменение температуры воздуха, осредненной за 4 месяца, с 1970 по 2020 гг в Чукотском море

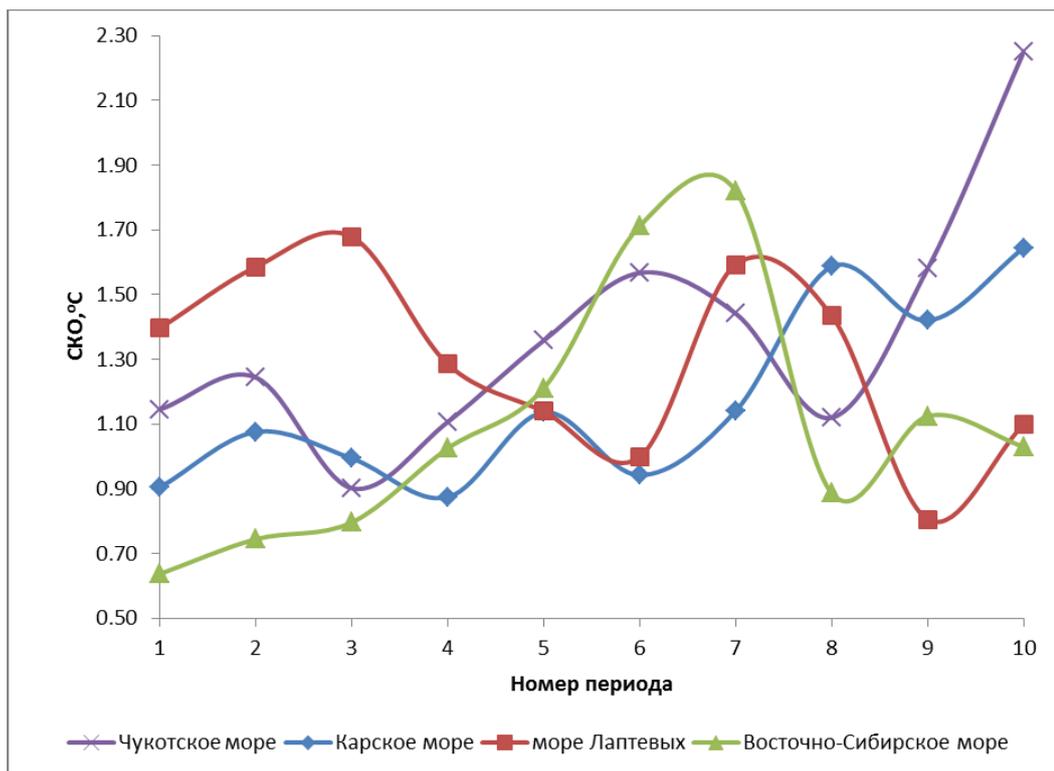


Рис. 14. Изменение СКО температуры осредненной за десять лет, со сдвигом 5 лет

Таблица 2.- Рассчитанные значения СКО

№	Период, гг.	СКО			
		Карское море	море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море
1	1970-1979	0.90	1.40	0.64	1.15
2	1975-1984	1.08	1.59	0.74	1.24
3	1979-1988	0.99	1.68	0.80	0.90
4	1984-1993	0.87	1.29	1.03	1.11
5	1989-1998	1.14	1.14	1.21	1.36
6	1993-2002	0.94	1.00	1.71	1.57
7	1998-2007	1.14	1.59	1.82	1.44
8	2003-2012	1.59	1.43	0.89	1.12
9	2008-2017	1.42	0.81	1.12	1.58
10	2012-2020	1.64	1.10	1.03	2.25

Анализ результатов расчетов и графиков показал:

1. Для всех морей СМП наблюдается рост среднегодовой температуры на величину от 1 °С до 4 °С. Осредненная температура за июнь-сентябрь возросла в среднем на 1-2 °С.

2. При анализе тренда температуры выявлено, что среднегодовые значения температуры изменяются со скоростью от 0,06 до 0,09 °С/год, а осредненные значения температуры воздуха за четыре месяца росли со скоростью от 0,04 до 0.06 °С/год. Причем, скорость роста среднегодовой температуры для Карского и Чукотского морей выше, чем для Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых.

3. Среднее квадратическое отклонение среднегодовой температуры лежит в диапазоне 1,5- 1.8 °С. СКО температуры осредненной за четыре месяца, лежит от 1 до 1.5 °С. С ростом температуры изменяются значения среднего квадратического отклонения для Карского и Чукотского приблизительно от 1 до 2 °С, а для моря Лаптевых и для Восточно-Сибирского моря размах колебаний СКО достигает примерно 1 °С.

#### 4. Изменчивость площади морского льда. Взаимосвязь температуры воздуха и ледовитости

Изменение климата приводит к изменению площади ледового покрова. В связи с тем, что в среднем температура воздуха в морях Северного морского пути растет, наблюдается уменьшение площади ледового покрова, что отчетливо видно на рис. 15-18, где представлено изменение площади морского льда в сентябре с 1980 по 2021 гг. в Карском море, море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях, соответственно.

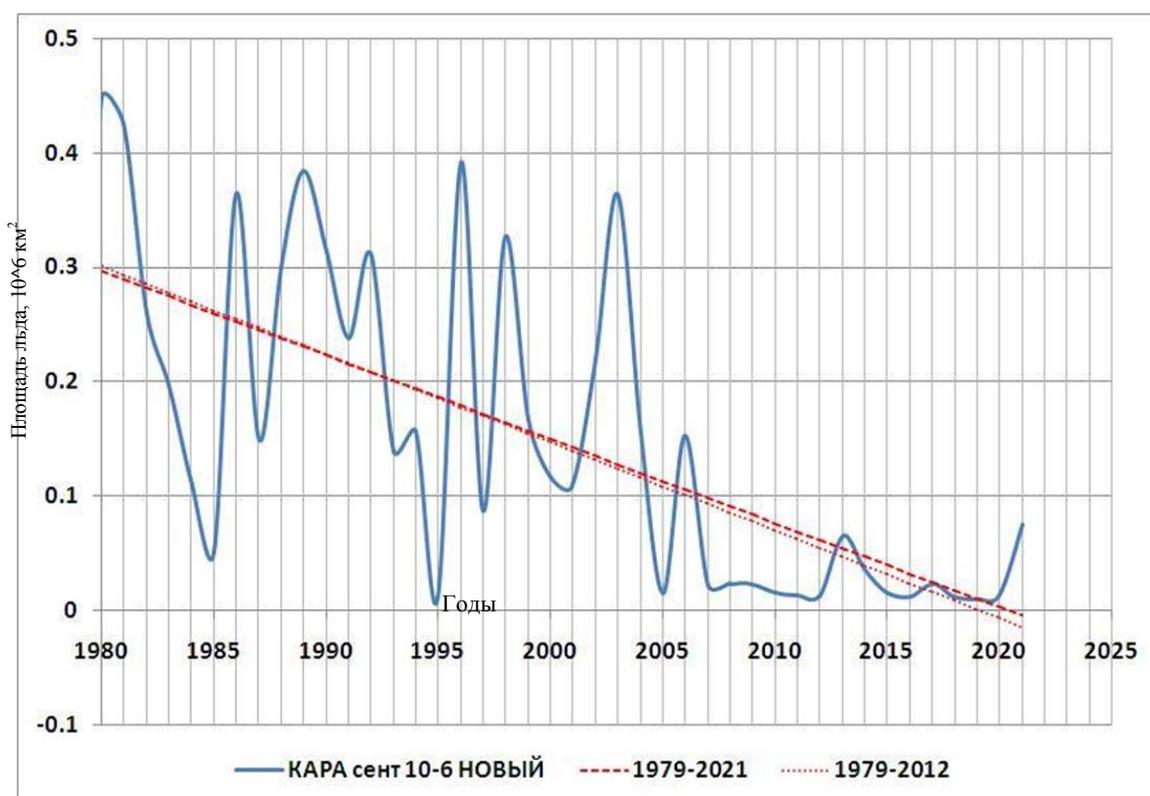


Рис. 15. Изменчивость площади морского льда в Карском море в сентябре за период с 1980 по 2021 гг.

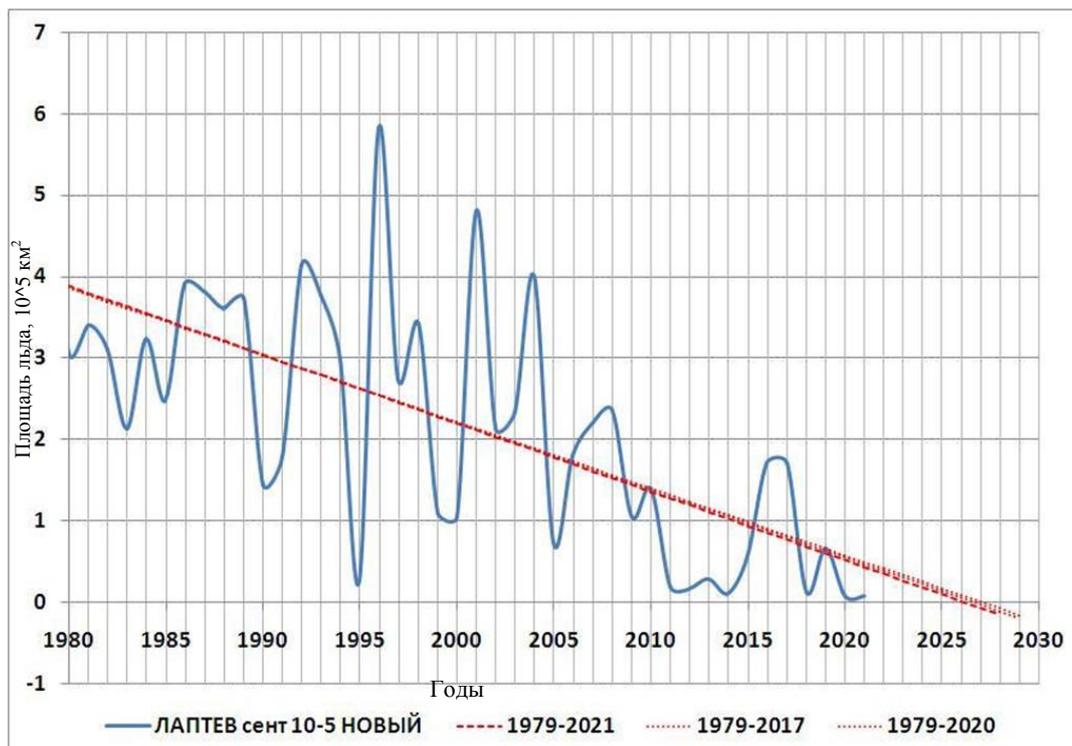


Рис. 16. Изменчивость площади морского льда в море Лаптевых в сентябре с 1980 по 2021 гг.

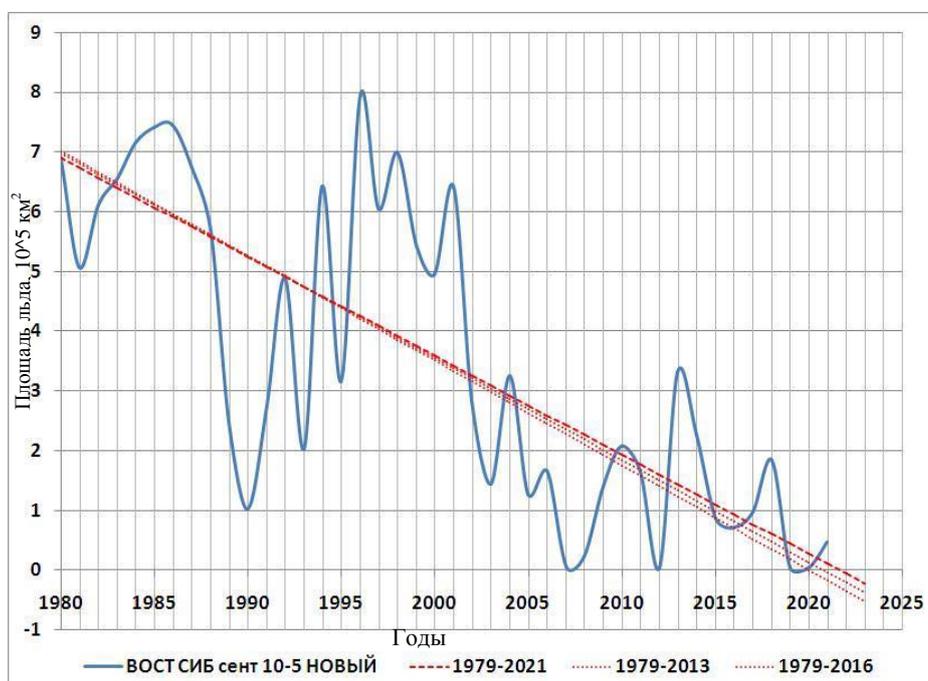


Рис. 17. Изменчивость площади морского льда в Восточно-Сибирском море в сентябре с 1980 по 2021 гг.

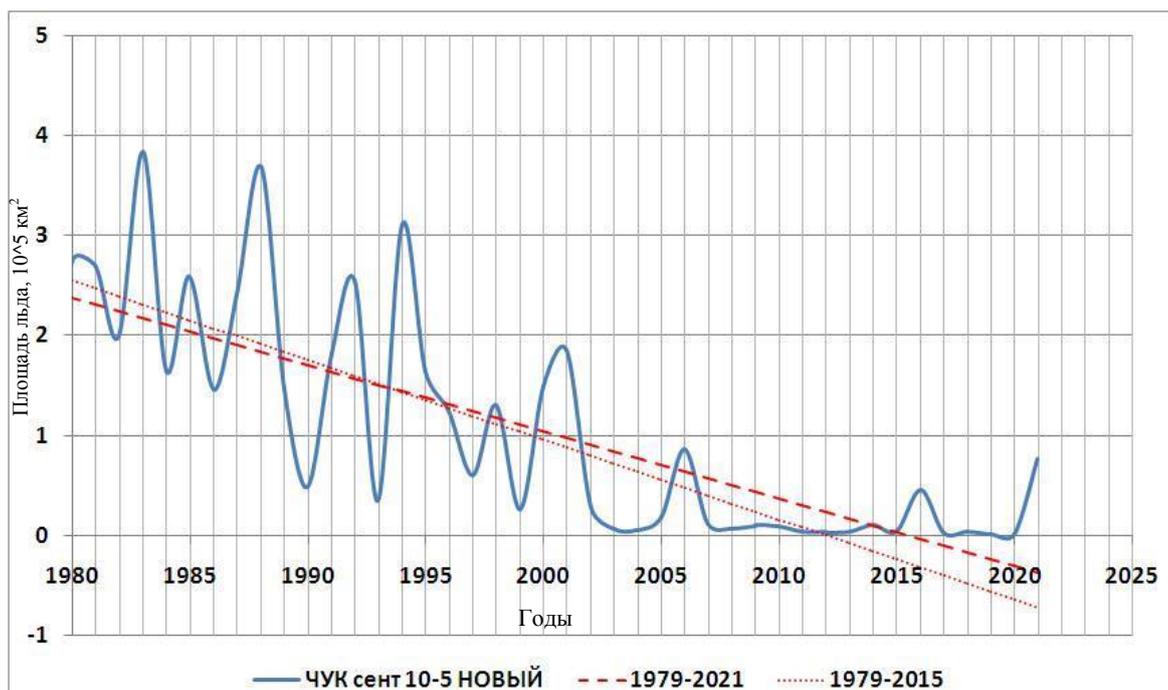


Рис. 18. Изменчивость площади морского льда в Чукотском море в сентябре с 1980 по 2021 гг.

С целью оценки части акватории морей СМП, свободной ото льда, было проведено нормирование покрытой льдом площади на площадь моря. На рисунках 19-22 для сравнения приведены графики изменения среднегодовой температуры, осредненной за 4 месяца и части моря покрытой льдом.

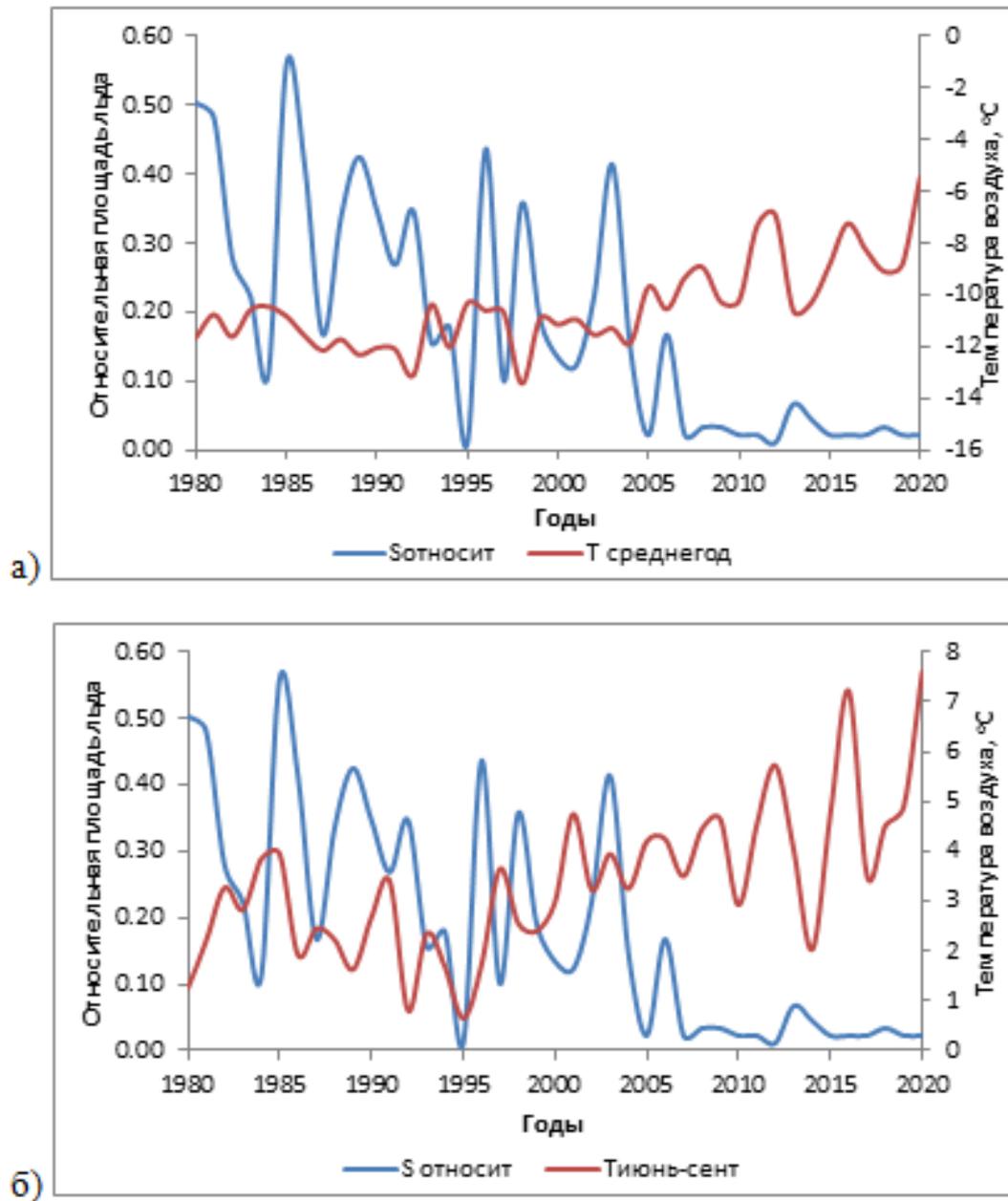


Рис. 19. Изменение относительной площади льда (а,б), среднегодовой ход температуры (а), ход температуры за июнь-сентябрь(б) в Карском море с 1980 по 2020 гг

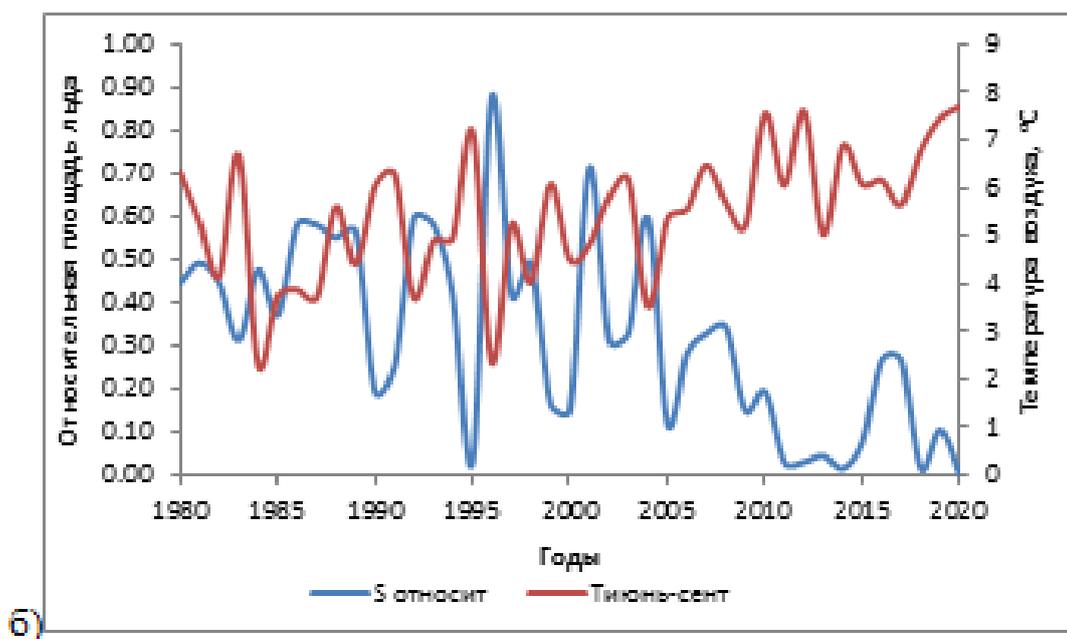
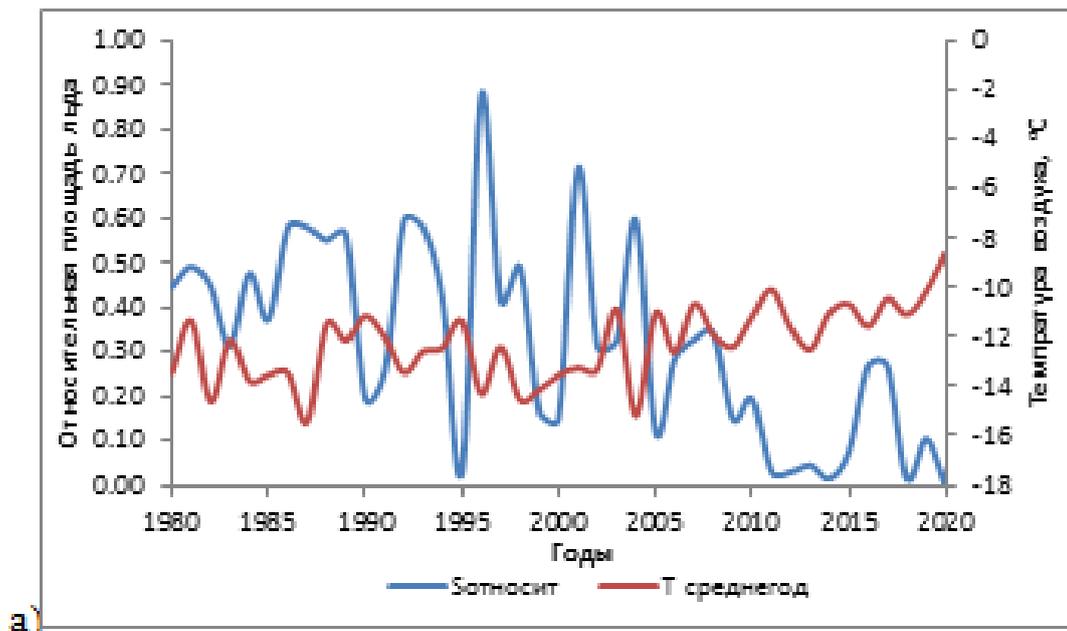


Рис. 20. Изменение относительной площади льда (а,б), среднегодовой ход температуры (а), ход температуры за июнь-сентябрь (б) в море Лаптевых с 1980 по 2020 гг.

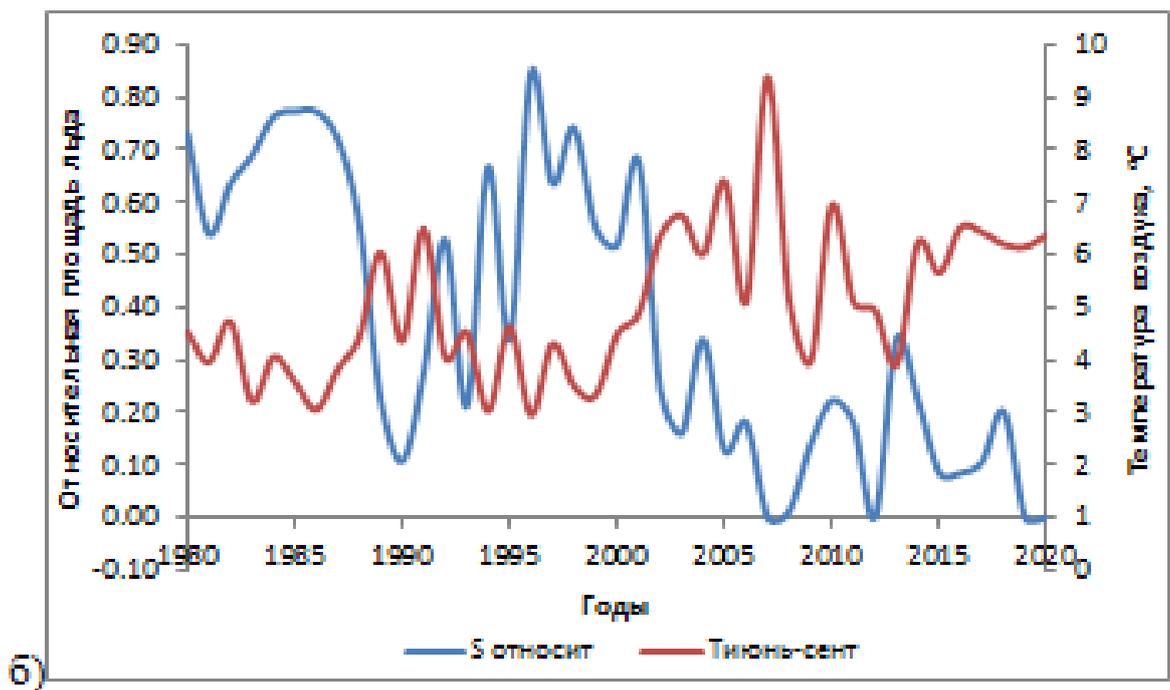
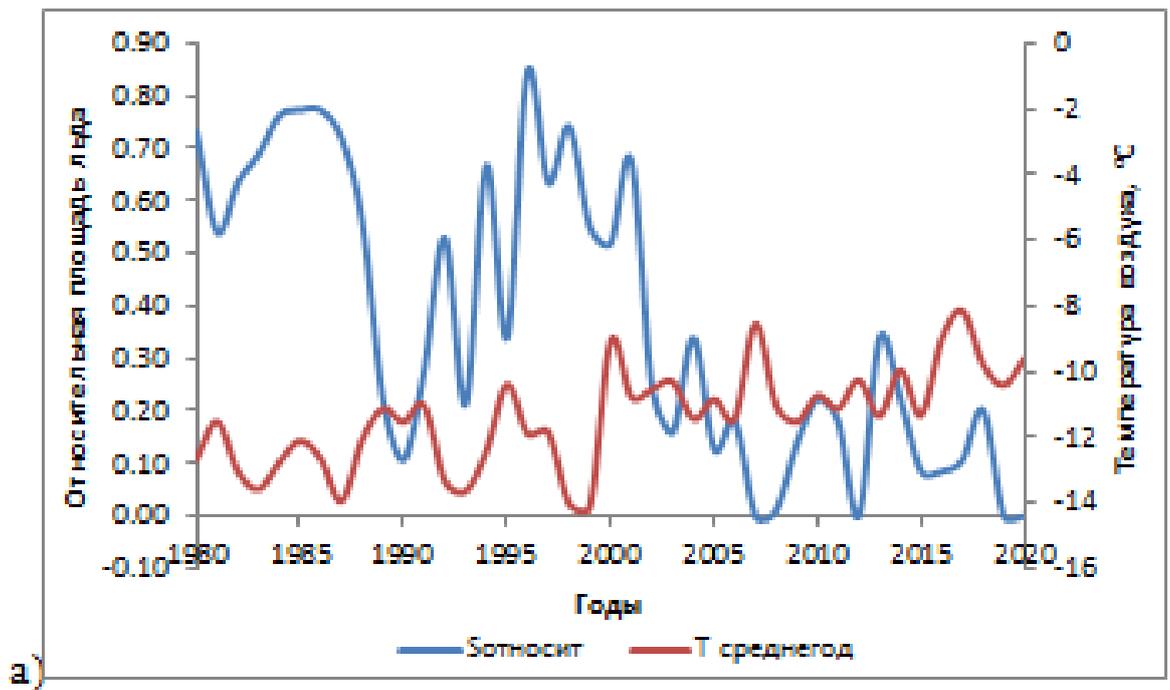


Рис. 21. Изменение относительно площади льда (а,б), среднегодовой ход температуры (а), ход температуры за июнь-сентябрь (б) в Восточно-Сибирском море с 1980 по 2020 гг.

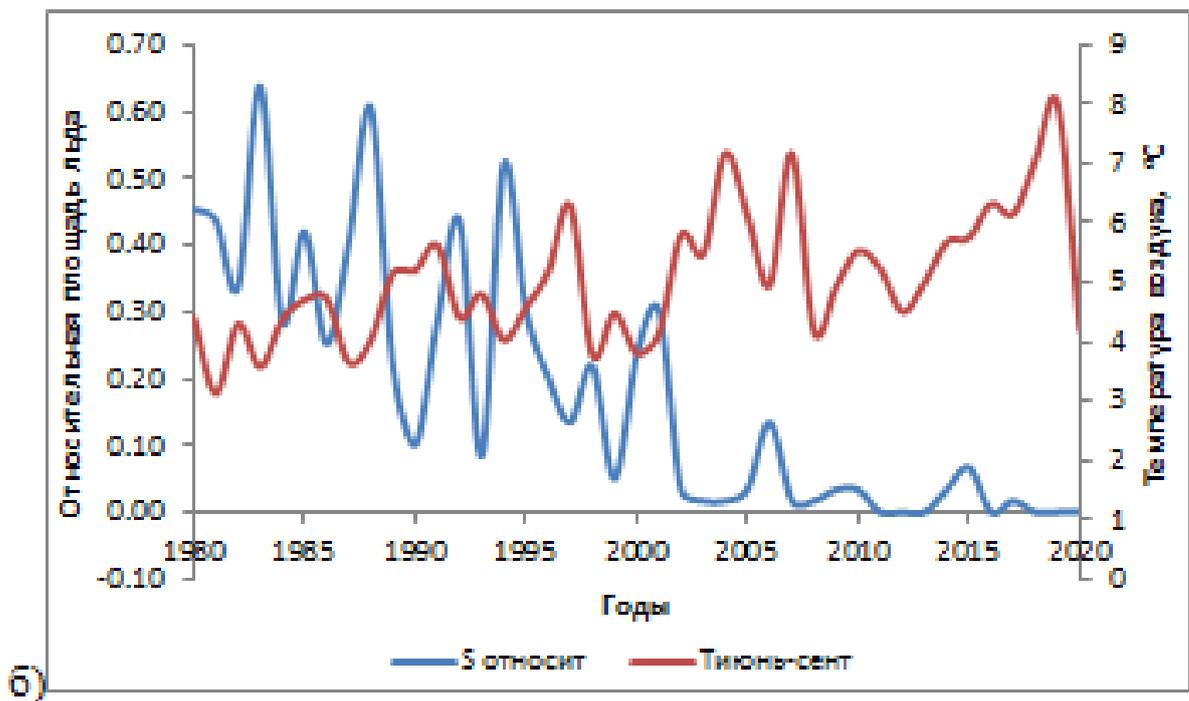
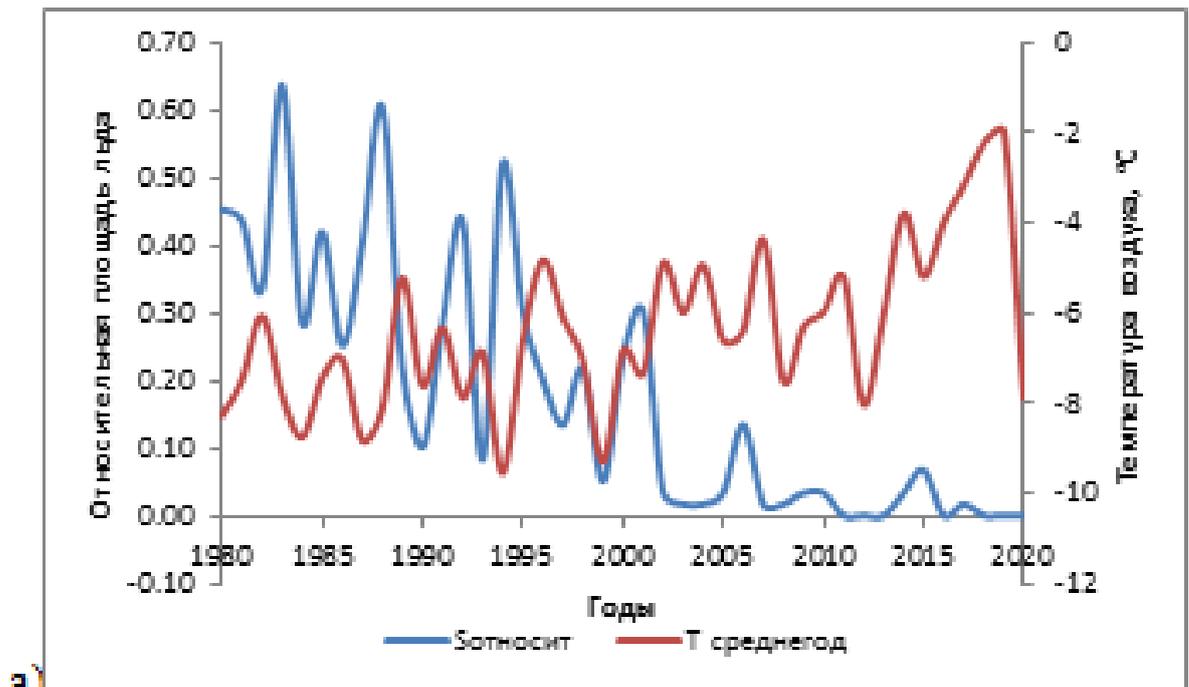


Рис. 22. Изменение относительной площади льда (а,б), среднегодовой ход температуры (а), ход температуры за июнь-сентябрь (б) в Чукотском море с 1980 по 2020 гг.

Анализ графиков (на рисунках 19-22) показывает:

- При малом среднем изменении температуры площадь ледового покрова меняется незначительно.
- Среднее повышение температуры за несколько лет приводит к уменьшению площади ледового покрова.

Эти данные подтверждаются корреляционным анализом между температурой и площадью ледового покрова, представленном в таблице № 3.

Анализ таблицы показал, что имеются тенденции более высокой взаимосвязи процессов в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море по сравнению с Карским и Чукотским морями, а также, что на таяние льда большее влияние оказывает увеличение температуры в летние месяцы.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между температурой и относительной площадью льда

Моря	Коэффициент корреляции ( $r$ ) между $T_0$ и $Sot_{n,l}$	Коэффициент корреляции ( $r$ ) между $T_4$ и $Sot_{n,l}$
Карское	- 0,83 < <b>-0.64</b> < -0,45	-0.76 < <b>-0.52</b> < -0.29
Лаптевых	-0.83 < <b>-0.63</b> < -0.44	-0.88 < <b>-0.74</b> < -0.59
Восточно-Сибирское	-0.84 < <b>-0.66</b> < -0.48	-0.88 < <b>-0.73</b> < -0.58
Чукотское	-0.79 < <b>-0.57</b> < -0.35	-0.82 < <b>-0.64</b> < -0.44

## Заключение

В ходе исследований изменчивости климата вдоль трассы Северного морского пути выявлены следующие тенденции:

1. По изменению температуры воздуха :
  - Более высокая скорость роста среднегодовой температуры воздуха в Карском и Чукотском морях(по сравнению с морем Лаптевых и Восточно-Сибирским морем) свидетельствует о влиянии Атлантического и Тихого океанов на них.
    - Скорость роста температуры за месяцы июнь-сентябрь в 1,5-2 раза ниже скорости роста среднегодовой температуры для всех морей Северного морского пути
2. По дисперсии:
  - Потепление климата вдоль трассы Северного морского пути приводит к увеличению дисперсии флуктуации температуры для Карского и Чукотского морей и увеличению разброса флуктуации дисперсии для Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых, что связано с влиянием океанов для окраинных морей СМП и континента –для внутренних морей Севморпути.
3. По взаимосвязи изменчивости температуры и ледовитости:
  - Рост среднегодовой температуры и рост температуры с июня по сентябрь приводит к уменьшению площади моря, покрытой льдом, причем, наблюдается зависимость от близости морей СМП к Атлантическому и Тихому океанам (Карское и Чукотское) и к Сибири (Восточно-Сибирское и море Лаптевых)
    - Для среднегодовой температуры значения корреляции с площадью ледового покрова выше для Карского и Чукотского морей, чем для Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых.

Таким образом в ходе выполнения дипломной работы решены поставленные задачи:

1. Дано описание географическим характеристикам морей Северного морского пути (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское).
2. Дана оценка изменчивость температуры воздуха для морей СМП.
3. Проведена оценка площади морского льда в исследуемых морях.
4. Исследованы взаимосвязи изменения температуры воздуха и ледовитости морей Севморпути.
5. Сделаны выводы о тенденция изменчивости климата вдоль трассы Северного морского пути.

Решение задач позволило достичь цели выпускной квалификационной работы «Изменчивость климата вдоль трассы Северного морского пути».

## Список используемых источников

1. Федеральный закон от 30.04.1999 № 81-ФЗ "Кодекс торгового мореплавания"// Статья 5.1. Плавание в акватории Северного морского пути от 28.07.2012 № 132-ФЗ.
2. Открытие северного морского пути Галушко И.Г., Поддубная В.С., Лопатюк Е.А. Вестник современных исследований. 2018. № 12.1 (27). С. 323-325.
3. Инвестиционный портал Арктической зоны России [электронный ресурс] <https://arctic-russia.ru/>
4. Большая российская энциклопедия [электронный ресурс] <https://bigenc.ru/>
5. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М., Изд-во МГУ, 1982 г. С ил., 192 с.
6. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник.– СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 404 с
7. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации» – СПб.: РГГМУ, 2010. – 74с.
8. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мирового центра данных// [электронный ресурс]//<http://meteo.ru/>
9. Информационные материалы по мониторингу морского ледяного покрова Арктики и Южного Океана // Бюллетень ААНИИ. № 47(532).СПб, 2021. 42 р.: <http://wdc.aari.ru/datasets/doo42/>