



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)

На тему: Исследование изменчивости ледовитости Арктических морей.

Исполнитель Бойко Анастасия Игоревна  
(фамилия, имя, отчество)

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

Шевчук Олег Игоревич  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

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

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

Лукьянов Сергей Васильевич  
(фамилия, имя, отчество)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Физико-географическое описание СЛО.....	5
1.1. Географическое положение.....	5
1.2 Моря.....	7
1.3 Рельеф.....	7
1.4 Климат.....	8
1.6 Течения.....	9
1.7. Морской лед.....	11
1.8. Исследуемые моря.....	15
1.8.1 Баренцево море.....	15
1.8.2. Карское море.....	15
1.8.3. Море Лаптевых.....	16
1.8.4. Восточно-Сибирское море.....	17
1.8.5. Чукотское море.....	17
1.8.6. Море Бофорта.....	17
1.8.7. Гренландское море.....	18
1.8.8. Море Баффина.....	19
1.8.9 Берингово море.....	20
1.8.10. Охотское море.....	20
2. Исходные данные и методы исследования.....	21
2.1. Исходные данные.....	21
2.2. Статистические методы исследования.....	21
2.2.2. Корреляционный анализ.....	22
2.2.3. Взаимнокорреляционный анализ (кросскорреляция).....	22
3. Исследование изменчивости ледовитости Арктического бассейна....	24
3.1. Межгодовой ход ледовитости морей Северного Ледовитого океана и глобальной температуры воздуха.....	24
3.2. Расчет взаимнокорреляционной функции (кросскорреляция).....	28

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	48
Список литературы: .....	49

### Список используемых сокращений

СЛО – Северный Ледовитый океан

ВКФ – взаимнокорреляционная функция

КК – коэффициент корреляции

КР – коэффициент регрессии

ПМЛ – площадь морского льда

АМО - Атлантическая мультидекадная осцилляция

## ВВЕДЕНИЕ

Климат Земли меняется, и полюса особенно чувствительны к глобальному потеплению, что наиболее явно сказывается на Арктике. Хотя летом морской лед значительно сократился по сравнению с предыдущими десятилетиями, а атмосферное потепление усиливается над Арктикой, изменения в океане менее очевидны из-за его большей инерции. Тем не менее, воздействие изменения климата на высокоширотные и полярные океаны уже наблюдается и, как ожидается, будет усиливаться. [22]

В следствие глобального потепления климата происходят изменения ледяного покрова Арктики в последние десятилетия. В некоторых источниках [2] указывают на тот факт, что в течение последних 50 лет Северный Ледовитый океан прогревается в два раза быстрее, чем остальная часть Земли. Исходя из этого, к концу 2030-х годов Северный ледовитый океан, в летнее время года, может быть в большей степени свободен от морского льда, чем на данный момент. В этом есть некоторый плюс – судоходство в Арктике будет более жизнеспособным в месяцы, когда сокращения ледового покрова максимальны.

Объект исследования: Арктический бассейн.

Целью данной работы является исследование изменчивости ледовитости Северного Ледовитого океана в условиях изменяющегося климата.

Задачи:

1. Исследование климатических особенностей исследуемых морей СЛО.
2. Анализ межгодового хода ледовитости и температуры воздуха.
3. Анализ расчетов взаимнокорреляционной функции.

# 1 Физико-географическое описание СЛО

## 1.1. Географическое положение

Северный Ледовитый океан располагается между Европой, Азией и Северной Америкой, в основном к северу от Полярного круга. В его состав входят: Баренцево море, Белое море, Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море и Чукотское море, Берингово море, море Баффина и Бофорта, Норвежское, а также Гренландское моря. [3]

СЛО изолирован от остального Мирового океана, соединяется с Тихим океаном через узкий Берингов пролив, а с Атлантическим – через Девисов, Фарерско-Исландский, Фарерско-Шетландский и Датский проливы. Общая площадь: 15,558 млн кв. км., объем - 18,07 млн. км<sup>3</sup> (это около 4% площади Мирового океана, 1,35% его объёма), наибольшая глубина – 5527м (северо-восточная часть Гренландского моря). Шельфовая зона с глубинами до 200 м занимает 39,6% площади всего северного Ледовитого океана. [4]



Рис.1. Карта Северного Ледовитого океана. [21]

СЛО обладает, по сравнению с другими океанами, некоторыми специфическими свойствами:

- во-первых, своим географическим положением в околополюсном регионе;
- наличие ледяного покрова практически на всей территории Арктики;
- отрицательный радиационный баланс в зимнее время года;
- отрицательный знак суммарного годового потока тепла, т.е. температура на поверхности океана ниже, чем на глубине;
- обособленность от других океанов.

Океан имеет 10 морей, большая часть которых расположена у берегов Евразии. В акватории океана много крупных островов и архипелагов: Гренландия, Канадский Арктический архипелаг, Новая Земля, Северная Земля, Шпицберген, Новосибирские, Земля Франца Иосифа и др. [5]

## 1.2 Моря

По физико-географическим особенностям и гидрологическому режиму в пределах Северного Ледовитого океана выделяют: Северо-Европейский бассейн – моря Гренландское, Норвежское, Баренцево и Белое; Арктический бассейн – глубоководная центральная часть Северного Ледовитого океана и моря азиатской и американской материковой отмели – Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское, Бофорта, Баффина, Линкольна, Гудзонов залив. Арктический бассейн делится подводным хребтом Ломоносова на суббассейны: Евразийский и Амеразийский.

Некоторые географы выделяют как отдельную часть – Канадский Арктический бассейн (моря Канадского Арктического архипелага – Баффина м., Линкольна м. и Гудзонов зал.), а моря Норвежское и Гренландское иногда выделяют как Норвежско - Гренландский бассейн, некоторые зарубежные географы не включают в границы СЛО Норвежское море. Моря, заливы и проливы занимают большую часть площади океана – почти 70% (10,28 млн. км<sup>2</sup>); на моря, омывающие берега России, приходится свыше 50% их площади. [4]

## 1.3 Рельеф

Северный Ледовитый океан состоит не из одного бассейна, а из двух основных глубоководных бассейнов, которые разделены на четыре меньших бассейна тремя трансокеанскими подводными хребтами. Центральный из этих хребтов простирается от континентального шельфа у острова Элсмир до Новосибирских островов расстояние 1770 км. Эта огромная подводная горная цепь была обнаружена советскими учеными в 1948-49 годах и опубликована в

1954 году. Хребет назван хребтом Ломоносова в честь ученого, поэта и грамматика Михаила Васильевича Ломоносова.

Хребет Ломоносова делит Северный Ледовитый океан на два бассейна. Они называются Евразийским бассейном на европейской стороне хребта и Амеразийским бассейном на американской стороне.

Евразийский бассейн разделен на два меньших бассейна транс-Ледовитым океаническим расширением Срединно-Атлантического хребта. Этот арктический сегмент глобальной системы хребтов называется кордильерами Нансена, который был назван в честь Фритьофа Нансена после его открытия в начале 1960-х годов. Самый маленький из суббассейнов Северного Ледовитого океана, называемый бассейном Нансена, лежит между хребтом Нансена-Гаккеля и евразийской континентальной окраиной и имеет глубину дна 4206,24 м.

Бассейн Амеразии разделен на два неравных бассейна широкой, изрезанной подводной горной цепью, которая простирается на 1402,08 м от поверхности океана. Происхождение этого сейсмически неактивного хребта, который был обнаружен в конце 1950-х годов, неизвестно. Бассейн Макарова лежит между Альфа-Кордильерами и хребтом Ломоносова, а его дно находится на глубине 4023,36 м. Крупнейшим суббассейном Северного Ледовитого океана является Канадский бассейн, который простирается примерно на 1126,54 км от шельфа Бофорта до Альфа-Кордильер. Гладкое дно бассейна плавно наклоняется с востока на запад, где оно прерывается областями морских холмов. Средняя глубина Канадского бассейна составляет 3810 м. [1]

## 1.4 Климат

На климатическое состояние Северного Ледовитого океана влияет солнечная радиация, а также периодическое прохождение атмосферы и речных

потоков с суши, которые окружают океан, принося ветры, осадки и температуру. Как правило, климат Северного Ледовитого океана подразделяется на долгую холодную зиму и короткое прохладное лето. Солнечная радиация является основой глобального и регионального климатического состояния.

Однако на солнечную радиацию влияют широты и вариации облачного покрова. Чем выше широта, тем меньше проникновение солнечного света, а частые колебания облачного покрова - значительные колебания проникновения света. Поскольку Северный Ледовитый океан находится в более высоких широтах, он подвергается очень холодному состоянию с присутствием льда, снега и воды. Наличие солнечного света создает четыре сезона Северного Ледовитого океана: зиму (с ноября по февраль), лето (около 21 июня), весну (март и апрель) и осень (сентябрь и октябрь).

С точки зрения температуры январь и июль получают самую холодную и самую теплую температуру соответственно. Летняя температура в основном влияет на температуру Северного Ледовитого океана. Он может испытывать длительный период непрерывного солнечного света или длительный период отсутствия солнечного света. Зимой температура в среднем от -30 до -35 °С. Летом таяние морского льда имеет температуру 0 °С. Дополнительная солнечная радиация в основном предназначена для того, чтобы растопить лед, но не для повышения температуры. [7]

## 1.6 Течения

В Северном Ледовитом океане есть два основных течения - круговорот Бофорта и Трансполярный дрейфовый поток. Поверхностные воды Северного Ледовитого океана обычно циркулируют по часовой стрелке, двигаясь с востока на запад вокруг полярной ледяной шапки. Тихий океан приносит холодные воды в Северный Ледовитый океан через Берингов пролив. Затем воды смешиваются

с водами рек, а затем текут в круговорот Бофорта, где сильный ветер заставляет воду течь по часовой стрелке.

Однако, когда ветер слабый, вода будет выведена из круговорота и потечет в Северный Атлантический океан. Вода из Северной части Атлантического океана может снова вернуться в Северный Ледовитый океан, принося теплые и соленые воды, что делает его более плотным и, следовательно, опускается ниже Северного Ледовитого океана. Повышенная соленость приводит к отсутствию движения в глубоких водах Северного Ледовитого океана, вызывая накопление застойной холодной воды на дне Арктического бассейна.

Арктическое течение медленно закручивает воду Арктического бассейна, которая поворачивает полярную ледяную шапку, совершая полный оборот каждые четыре года. С другой стороны, трансполярный дрейфовый поток несет пресную воду из моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря в пролив Фрама. Поток трансполярного дрейфа приводит к смешиванию пресных вод в Канадском бассейне в арктических водах. [7]

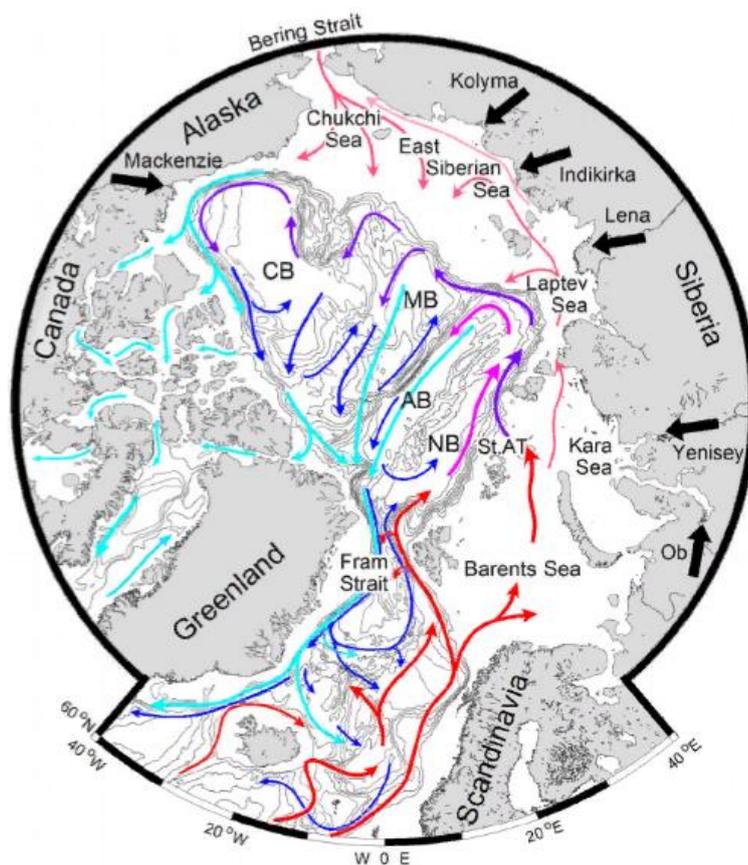


Рис.2. Доминирующие течения Северного Ледовитого океана с приходящими относительно теплыми поверхностными течениями (красный) и более холодными поверхностными течениями (светло-синий) вместе с промежуточными и глубинными течениями (бордовый и темно-синий). Характеристики Северного Ледовитого океана сокращены следующим образом: Канадский бассейн (CB), бассейн Макарова (MB), бассейн Амундсена (AB), бассейн Нансена (NB) и впадина Святой Анны (St.AT ) [24]

### 1.7. Морской лед

Арктический морской лед является чувствительным индикатором изменения климата, и изменения в морском ледяном покрове могут иметь потенциальные последствия для арктического региона и за его пределами.

Морской лед - это замороженная морская вода, которая плавает на поверхности океана. Он образуется в регионах высоких широт, где зимой мало

солнечного света или его вообще нет, и поэтому атмосферные условия достаточно холодные, чтобы океан замерзал. Морской лед является важным компонентом климатической системы, поскольку он регулирует передачу тепла и импульса между атмосферой и океаном. Он также создает барьер для обмена пресной водой, газами и аэрозолями (крошечными, переносимыми по воздуху твердыми и жидкими частицами). Морской лед также является основным компонентом полярных экосистем, поскольку растения и животные на всех уровнях пищевой цепи живут в морском льду или вокруг него. Поскольку морской лед образуется из замерзшей морской воды и плавает на поверхности моря, таяние льда не способствует повышению уровня моря (в отличие от тающих ледников и ледяных щитов, которые являются хранилищами замерзшей воды на суше и при таянии добавляют воду в океан).

#### Характеристики морского льда

Количество морского льда, присутствующего в Арктике (и Антарктике), меняется в течение года в результате солнечного нагрева, получаемого полярными регионами. Они практически не видят солнечного света зимой и почти не видят его летом. По мере того как летом поверхность Земли на полюсах нагревается, более половины морского льда тает, открывая открытый океан внизу. Затем, когда поверхность охлаждается осенью, океан снова начинает замерзать, что приводит к увеличению морского ледяного покрова в зимние месяцы. По крайней мере, 15% океана покрыто морским льдом в какой-то момент в течение года. Доступен обзор состава и поведения морского льда.

#### Важность морского льда в климатической системе

Океан способен удерживать тепло от Солнца более эффективно, чем атмосфера (океан обладает более высокой "теплоемкостью"). Эта увеличенная "память" тепла означает, что сезонный цикл океана примерно на три месяца отстает от цикла атмосферы. Таким образом, взаимодействие океана и атмосферы обычно приводит к ослаблению сезонного цикла; океаны

задерживают охлаждение атмосферы осенью и, наоборот, задерживают потепление атмосферы весной.

Присутствие морского льда вблизи полюсов меняет эту взаимосвязь. Зимой, когда солнечное отопление минимально, а температура воздуха самая низкая, морской лед защищает океан от потери тепла в атмосферу над ним. И наоборот, в летние месяцы морской лед обладает охлаждающим эффектом, поскольку он не позволяет океану поглощать как можно больше тепла от солнечной радиации или из атмосферы. В частности, морской лед имеет более высокую отражательную способность (или "альбедо"), чем океан, что приводит к тому, что больше солнечных лучей отражается обратно в космос, а не поглощается климатом Земли. Наличие снега на поверхности морского льда усиливает как изолирующие, так и отражающие свойства морского льда.

#### Арктический морской лед в условиях потепления климата

Даже небольшие изменения в атмосфере и океане могут резко изменить годовой цикл таяния и роста морского льда, а это означает, что изменения морского льда отражают совокупные изменения, происходящие как в океане, так и в атмосфере. Поэтому, помимо того, что морской лед является важным компонентом климатической системы, его можно рассматривать как показатель или "барометр" изменения климата в полярных регионах и за их пределами. Однако арктический морской лед - это нечто большее, чем просто чувствительный индикатор изменения климата; изменения морского льда могут иметь потенциальные последствия для арктического региона и за его пределами. Хотя климатическое таяние арктических льдов может повлиять на многие другие части климатической системы, все еще существует некоторая неопределенность в отношении того, как эти изменения повлияют на климат в дальнейшем, и эта область остается предметом продолжающихся исследований. Например, сокращение площади морского льда в Арктике было связано с изменениями струйного течения или колебаниями в Северной Атлантике - оба из которых играют определенную роль в определении зимних условий в Великобритании и

Западной Европе. Изменения в сезонном цикле арктического морского льда могут также влиять на соленость и плотность окружающего океана, что может иметь более широкие последствия для крупномасштабной океанической циркуляции.

В настоящее время около трети зимнего арктического морского льда остается замороженным в течение лета, превращаясь в "многолетний лед". Этот летний ледяной покров играет важную роль в климатической системе, поскольку он помогает регулировать поглощение тепла Северным Ледовитым океаном, отражая солнечные лучи. [23]

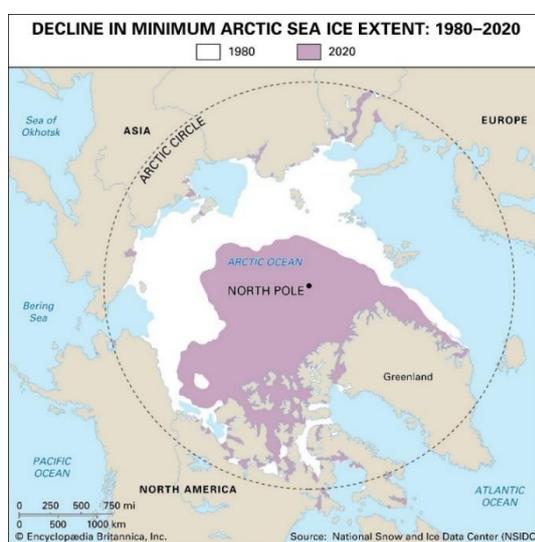


Рис.3. Арктический лед в период с 1980 по 2020 гг. [1]

Морской ледяной покров колебался на протяжении всей эпохи голоцена (11 700 лет назад и по настоящее время) в ответ на изменения уровня моря и увеличение высоты береговой линии после отступления плейстоценовых ледниковых щитов. Эти колебания были в основном сосредоточены в восточном Северном Ледовитом океане во время многолетних теплых эпизодов, где ледяной покров будет продвигаться и отступать с сезонами. Однако в конце 20-го века покрытие арктического морского льда постоянно сокращалось (около 3 процентов за десятилетие с 1978 года) в ответ на последствия глобального потепления, который поднимает региональные приповерхностные температуры воздуха выше нуля в течение длительных периодов года. [1]

## 1.8. Исследуемые моря.

### 1.8.1 Баренцево море

Баренцево море является самым западным среди всех арктических морей, омывающих берега России. Оно является самым глубоким из шельфовых морей, которые в совокупности формируют Арктический континентальный шельф. Западная граница Баренцева моря определяется разрывом шельфа, который проходит к северу от материковой части Норвегии и у западного побережья Шпицбергена, в то время, как восточная граница определяется архипелагом Новая Земля. [8]

Это один из самых беспокойных и изменчивых по погоде районов. По сравнению со всеми морями Арктики климат Баренцева моря отличается высокими температурами воздуха, мягкими зимами и большим количеством осадков. Суровость климата, по средним данным, возрастает в море с юга на север и с запада на восток. [9]

### 1.8.2. Карское море.

Карское море лежит на Сибирском шельфе, таким образом, около 40 процентов его составляет глубина менее 50 м, и только 2 процента имеют глубину более 500 м. На севере шельф разрезан двумя широкими глубоководными впадинами - Святой Анной к востоку от Земли Франца—Иосифа, глубиной 620 м, и параллельной впадиной Воронина, расположенной

примерно в 290 км к востоку, глубиной 450 м. К востоку от Новой Земли простирается Новоземельская впадина глубиной 200-400 м.

Водные массы Карского моря чрезвычайно холодные и стратифицированные. Зимой средняя температура воды составляет  $-1,6^{\circ}\text{C}$ ; летом она достигает  $6^{\circ}\text{C}$  в юго-западной части моря и  $2^{\circ}\text{C}$  на севере. Течения движутся двумя медленными вращениями против часовой стрелки в юго-западной и северо-восточной частях моря. [12]

### 1.8.3. Море Лаптевых.

Море Лаптевых, окраинное море Северного Ледовитого океана, ограниченное полуостровом Таймыр и островами Северная Земля на западе и Новосибирскими островами и островом Котельный на востоке. Он соединен на западе с Карским морем, а на востоке - с Восточно-Сибирским морем.

Температура воздуха ниже  $0^{\circ}\text{C}$  сохраняется на севере в течение примерно 11 месяцев, а на юге - 9 месяцев. Средняя температура января составляет от  $-31^{\circ}$  до  $-34^{\circ}\text{C}$ , минимальная  $-50^{\circ}\text{C}$ . В июле средняя температура на севере чуть выше точки замерзания, на юге около  $6^{\circ}\text{C}$ , максимум  $10^{\circ}\text{C}$ . У берегов максимальная температура может достигать  $24^{\circ}\text{C}$ . Зимой здесь часты штормы, метели и метели; летом снежные шквалы и туманы.

Большую часть года море покрыто льдом. Зимой температура воды подо льдом составляет  $30,6^{\circ}\text{F}$  ( $-0,8^{\circ}\text{C}$ ) на юго-востоке и  $28,8^{\circ}\text{F}$  ( $-1,8^{\circ}\text{C}$ ) на севере; в глубоководных районах она составляет от  $29,1^{\circ}$  до  $28,9^{\circ}\text{F}$  (от  $-1,6^{\circ}$  до  $-1,7^{\circ}\text{C}$ ). Летом в свободных ото льда районах тонкий слой воды прогревается выше точки замерзания. [13]

#### 1.8.4. Восточно-Сибирское море.

Восточно-Сибирское море, часть Северного Ледовитого океана между Новосибирскими островами (запад) и островом Врангеля (восток). На западе соединено с морем Лаптевых проливами Дмитрия Лаптева, Этерикан и Санникова; на востоке пролив Лонг соединяет его с Чукотским морем. Восточно-Сибирское море занимает площадь 936 000 квадратных километров; большую часть года покрыто льдом. Его наибольшая глубина составляет 155 м, но в западной и центральной частях она достигает 9-20 м. Есть несколько островных групп. Главными портами являются Певек в Чукотском автономном округе (округе) и Амбарчик в республике Саха (Якутия); навигация ограничена августом и сентябрем. [14]

#### 1.8.5. Чукотское море.

Чукотское море, часть Северного Ледовитого океана, ограниченная островом Врангеля (на западе), северо-восточной Сибирью и северо-западной Аляской (на юге), морем Бофорта (на востоке) и арктическим континентальным склоном (на севере). Его площадь составляет 582 000 квадратных километров, а средняя глубина составляет 77 м. Море судоходно с июля по октябрь как в восточном, так и в западном направлении от мелководного Берингова пролива, а холодные течения текут на юго-восток вдоль сибирского побережья. [15]

#### 1.8.6. Море Бофорта

Море Бофорта, море Северного Ледовитого океана, расположенное к северу от Канады и Аляски. Оно простирается на северо-восток от Пойнт-

Барроу, Аляска, к Лэндс-Энду на острове Принца Патрикааи на запад от острова Бэнкс до Чукотского моря. Его площадь составляет около 476 000 кв. км. Средняя глубина составляет 1 004 м, а наибольшая глубина - 4681,73 м. Названо в честь британского контр-адмирала сэра Фрэнсиса Бофорта.

Море Бофорта находится подо льдом почти круглый год; только в августе и сентябре лед ломается, да и то только у берегов. Можно выделить четыре водные массы. Толщина поверхностной водной массы составляет почти 330 футов, а температура колеблется от  $-1,4^{\circ}\text{C}$  в конце лета до  $-1,8^{\circ}\text{C}$  зимой. Подповерхностная водная масса, образованная водами Тихого океана и Берингова моря, протекающими через Берингов пролив, значительно теплее поверхностных вод и почти достигает Северного полюса. Глубокая Атлантика вода самая теплая из всех, ее температура колеблется от  $0^{\circ}$  до  $1^{\circ}\text{C}$ . Температура донной воды колеблется от  $-0,4^{\circ}$  до  $-0,8^{\circ}\text{C}$ . [16]

#### 1.8.7. Гренландское море.

Гренландское море, окраинная часть Северного Ледовитого океана, площадью 1 205 000 квадратных километров. Оно расположено к югу от собственно Арктического бассейна и граничит с Гренландией (запад), Шпицбергенем (восток), главным Северным Ледовитым океаном (север), Норвежским морем и Исландией (юг). Средняя глубина составляет 1450 м, а самая глубокая зарегистрированная точка - 4800 м.

Линия, соединяющая северо-восточную Исландию, изолированный остров Ян-Майени Медвежий остров (Бьернейя), образует условную границу между Арктическим Гренландским морем и Норвежским морем на юго-востоке. Линия также отмечает значительные подводные хребты и указывает на средний край арктического льда.

Сильные северные и северо-восточные ветры охлаждают поверхность моря и гонят холодные воды на юг. Температура воздуха у берегов Шпицбергена достигает  $-49^{\circ}\text{C}$ . и до  $25^{\circ}\text{C}$  от Гренландии. Средние значения для февраля, самого холодного месяца, составляют  $-10^{\circ}\text{C}$  на юге и  $-26^{\circ}\text{C}$  на севере. Август, самый теплый месяц, составляет в среднем  $5^{\circ}\text{C}$  на юге и  $0^{\circ}\text{C}$  на севере. Количество морозных дней колеблется от 225 (юг) до 334 (север). Количество осадков составляет 250 мм в год на севере и вдвое больше на юге. Температура поверхности воды колеблется от  $-1^{\circ}\text{C}$  на севере в феврале до  $6^{\circ}\text{C}$  на юге в августе.

Восточно-Гренландское течение приносит лед с севера и раздваивается у центрального хребта. Ветви теплых атлантических течений толкают плавучие льды на север. Ледовый сезон длится с октября по август следующего года, и лед включает арктический паковый лед (толщиной в несколько ярдов), морской лед (толщиной около ярда) и пресноводный лед в виде высоких айсбергов. Приливы и отливы вместе со сложной системой течений разрушают ледяной покров и вызывают смешение различных слоев воды. [17]

#### 1.8.8. Море Баффина.

Залив Баффина, рукав Северной части Атлантического океана площадью 689 000 квадратных км, простирающийся на юг от Арктики на 1450 км между побережьем Гренландии (восток) и островом Баффин (запад). Ширина залива варьируется от 110 до 650 км. Пролив Дэвиса (юг) ведет из залива в Атлантику, а пролив Нерес (север) - в Северный Ледовитый океан. Яма в центре залива, Баффиновая впадина, погружается на глубину 2100 м.

Климат суров, особенно зимой, когда северо-восточные ветры дуют с острова Баффин (на юге) и в северном секторе залива. Летом преобладают северо-западные и юго-западные ветры. Айсберги наблюдаются даже в августе;

ледяной покров формируется из арктического пакового льда, входящего через северные звуки, из местного морского льда и из айсбергов, которые откололись от соседних ледников. К концу октября ледяные поля достигают Гудзонова пролива (между островом Баффин и материковой частью Квебека), региона, где прибрежный лед уже утолщается, в основном вблизи Гренландии, где преобладающие восточные ветры создают защищенные условия. Центр залива Баффина покрыт зимой льдом, но на севере есть постоянная свободная ото льда область (“северная вода”), которая может быть связана с потеплением Западно-гренландского течения. [20]

#### 1.8.9 Берингово море

Берингово море - Самый северный участок Тихого океана, ограниченный Сибирью на северо-западе, Аляской на северо-востоке и отделенный от Тихого океана Алеутскими островами; соединяется с Северным Ледовитым океаном Беринговым проливом. По мере того, как край пакового льда тает и отступает каждую весну, он выделяет пресную воду и питательные вещества в морскую воду. Изменения во времени и местоположении талой воды могут повлиять на цветение фитопланктона, что, в свою очередь, может повлиять на всю экосистему Беринга. [18]

#### 1.8.10. Охотское море.

Охотское море является окраинным морем на северо-востоке России и северо-западным рукавом Тихого океана. Его размеры почти равны соседнему Берингову морю: около 1 528,100 км<sup>2</sup> по сравнению с 2 315 000 км<sup>2</sup>. Граничит с Российской Федерацией, а также его южная часть граничит с Японией. Курильские острова служат границей между Охотским морем и Тихим океаном с юго-востока, в то время как Алеутские и Командорские острова очерчивают район Берингова моря с юга. Общая ширина проливов, соединяющих Охотское море с Тихим океаном, составляет около 805 км столько же для Берингова моря – около 1126 км. Обмен воды через проливы в открытый Тихий океан оказывает

значительное влияние на циркуляцию и образование промежуточных вод в Охотском и Беринговом морях. [19]

## 2. Исходные данные и методы исследования.

### 2.1. Исходные данные.

В качестве исходных данных о площади льда по морям Арктического бассейна была выбрана база данных National Snow & Ice Data Centre (NSIDC), которая располагается по адресу: [https://nsidc.org/data/seaice\\_index/archives](https://nsidc.org/data/seaice_index/archives). В данной базе данных были взяты ежемесячные данные индекса льда в км<sup>2</sup> с временным промежутком январь 1980 по декабрь 2021 года.

Также в данной работе используется глобальная температура воздуха (HadCRUT5) на сетке 5° на 5° с временным промежутком январь 1980 по декабрь 2021 года из базы данных Climate Research Unit (University of East Anglia), адрес: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>.

В работе анализировались данные для следующих арктических морей: Баренцева, Бофорта, Баффина, Берингова, Восточно-Сибирского, Чукотского, Гренландского, Карского, Лаптевых и Охотского.

### 2.2. Статистические методы исследования.

В качестве методов исследования изменчивости ледовитости арктических морей были использованы: корреляционный анализ и взаимнокорреляционный анализ (кросскорреляция).

## 2.2.2. Корреляционный анализ.

Итак, для определения и оценки взаимосвязи между двумя или несколькими переменными используется корреляционный анализ. Коэффициент корреляции  $r$  – количественная мера, которая характеризует степень тесноты линейной зависимости.

Для исследования нескольких переменных во всех сочетаниях используется корреляционная матрица. Чтобы оценить степень связи между переменными нужно сделать проверку коэффициента корреляции на значимость: формулируется нулевая гипотеза  $H_0: r = 0$  и альтернативная  $H_1: r \neq 0$ .

Далее выбирается критерий Стьюдента, который рассчитывается по формуле:

$$t^* = \frac{|r|}{\sigma_r}, \quad \sigma_r = \frac{\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{N-2}},$$

где  $\sigma_r$  средняя квадратическая погрешность расчета коэффициента корреляции. После этого нужно определить критическое значение  $t_{кр}(\alpha, \nu)$ , где  $\alpha$  (уровень значимости) принимается равным 5%, а  $\nu$  (число степеней свободы) =  $N-2$ , где  $N$  – длина исследуемого ряда.

Следом сравнивается  $t^*$  и  $t_{кр}$ :

- в случае, когда  $t^* > t_{кр}$  нулевая гипотеза отвергается, т.е. коэффициент корреляции значим и между двумя исследуемыми переменными существует значимая связь.

- в случае, когда  $t^* < t_{кр}$  нулевая гипотеза не отвергается, т.е. коэффициент корреляции незначим и связь между двумя переменными отсутствует.

## 2.2.3. Взаимнокорреляционный анализ (кросскорреляция).

В свою очередь, кросскорреляция является мерой сходства двух рядов в зависимости от перемещения одного ряда относительно другого.

Так как взаимнокорреляционная функция несимметрична ряд X нужно сдвигать назад на то же количество сдвигов.

Коэффициент кросскорреляции можно рассчитать по формуле:

$$r(\pm\tau) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y (N-1-|\tau|)} \sum_{i=1}^{N-|\tau|} [(x_i - \bar{x})(y_{i\pm\tau} - \bar{y})]$$

где N – длина реализации;  $\tau$  – сдвиг, который меняется от  $-\tau_{\max}$  до  $\tau_{\max}$ . Максимальное количество сдвигов  $\tau_{\max}$  выбирается, исходя из длины ряда N, в данном случае, т.к. ряд короткий (42),  $\tau_{\max} = N/3$ .

Коэффициенты корреляции можно проверить на значимость. Все значения взаимнокорреляционной функции, по модулю превышающие уровень значимости являются значимыми.

Далее для того, чтобы спрогнозировать любую заблаговременность можно составить модель прогноза.

Сформулируем уравнение прогностической модели:

$$y_{i+k} = a_1 \cdot x_i + a_0 + \varepsilon,$$

Где  $k$  - заблаговременность прогноза.

Чтобы рассчитать коэффициенты регрессии нужно преобразовать два ряда исследуемых характеристик: в этом конкретном случае мы берем два исходных ряда, сдвинутые друг от друга (один с начала, другой с конца) на 6 значений и обрезаем их соответственно – один с начала, другой с конца. И после этих действий все полученные коэффициенты проверяются на значимость.

### 3. Исследование изменчивости ледовитости Арктического бассейна.

#### 3.1. Межгодовой ход ледовитости морей Северного Ледовитого океана и глобальной температуры воздуха.

Для каждого исследуемого в данной работе моря Северного Ледовитого океана были построены графики межгодового хода ледовитости и глобальной температуры воздуха с 1980 по 2021 гг., которые представлены ниже:

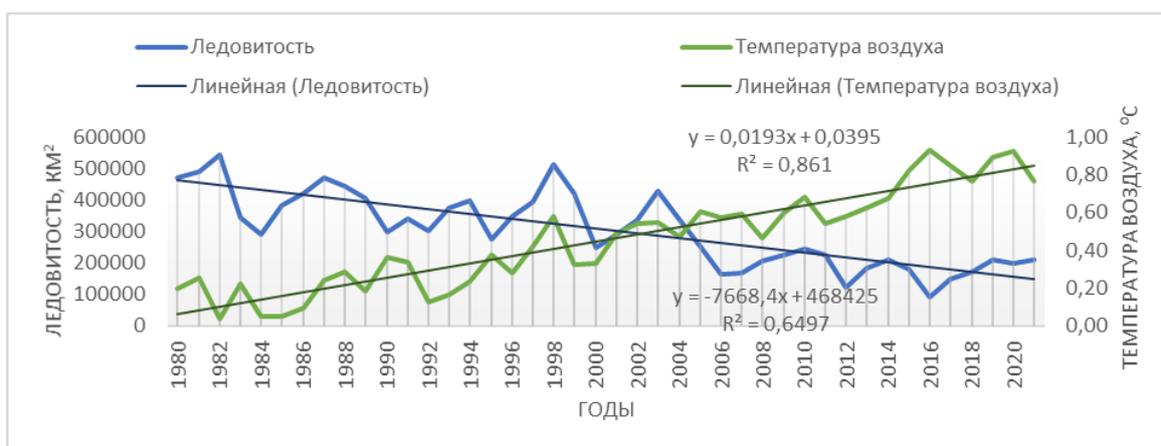


Рис.4.1. Межгодовой ход изменчивости ледовитости Баренцева моря и глобальной температуры воздуха за период с 1980 по 2021 гг.

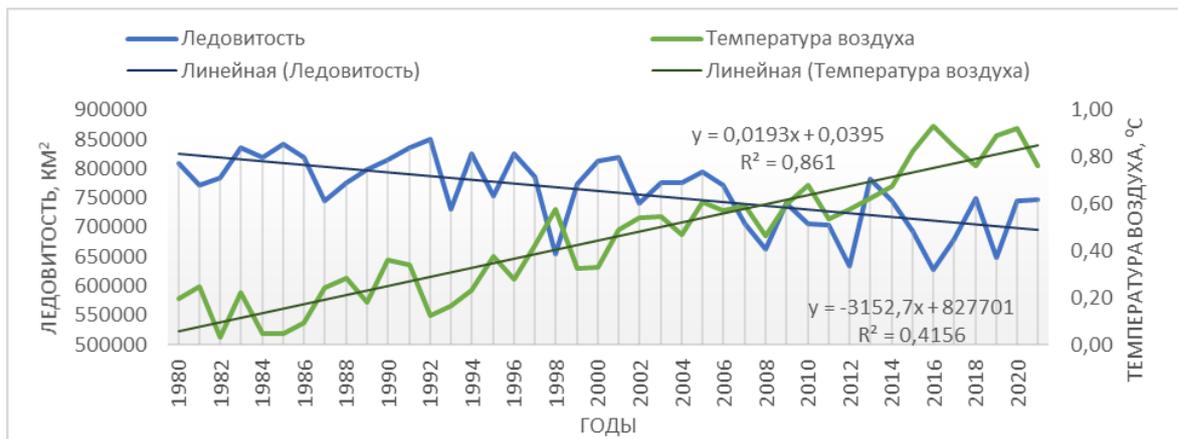


Рис.4.2. Межгодовой ход изменчивости ледовитости моря Бофорта и глобальной температуры воздуха за период с 1980 по 2021 гг.

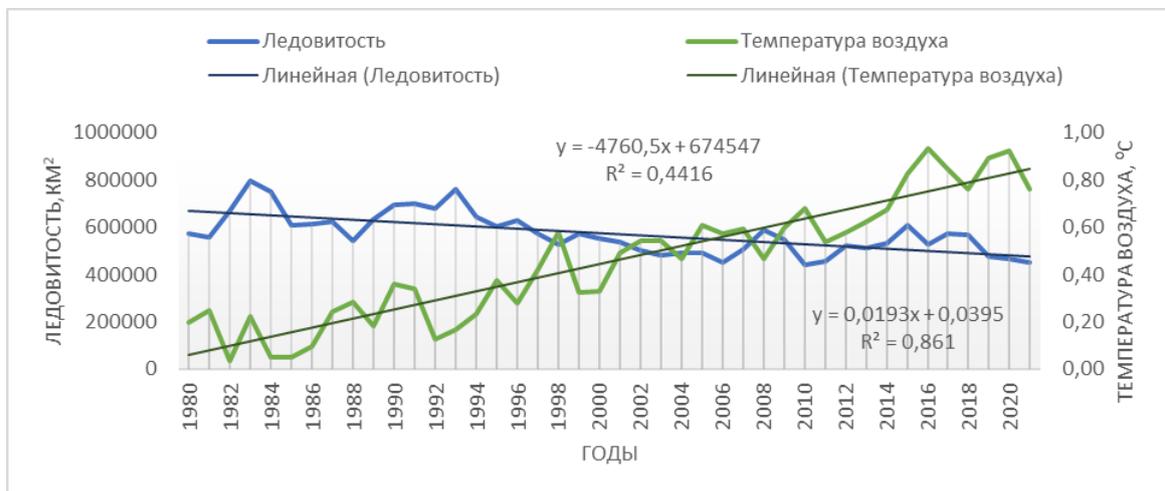


Рис.4.3. Межгодовой ход изменчивости ледовитости моря Баффина и глобальной температуры воздуха за период с 1980 по 2021 гг.

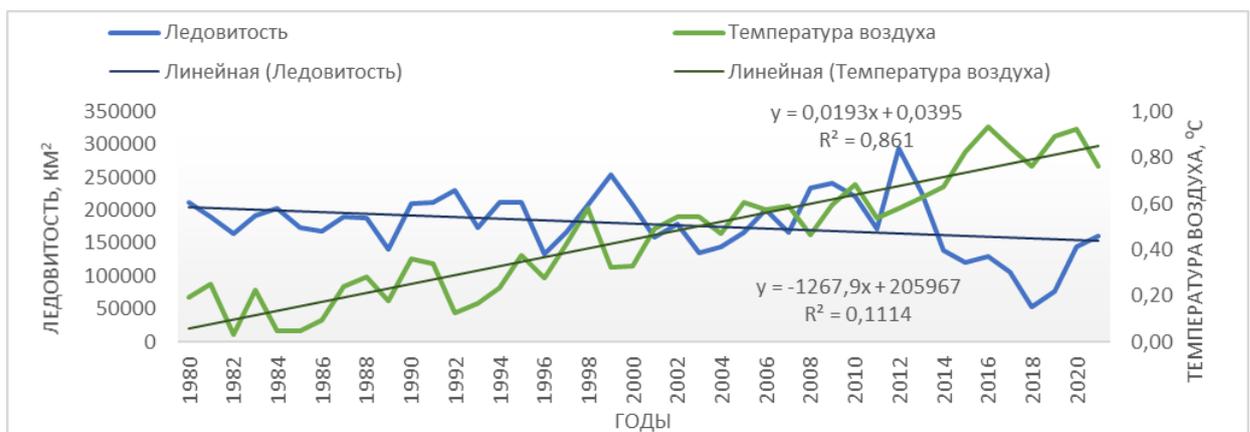


Рис.4.4. Межгодовой ход изменчивости ледовитости Берингова моря и глобальной температуры воздуха за период с 1980 по 2021 гг.

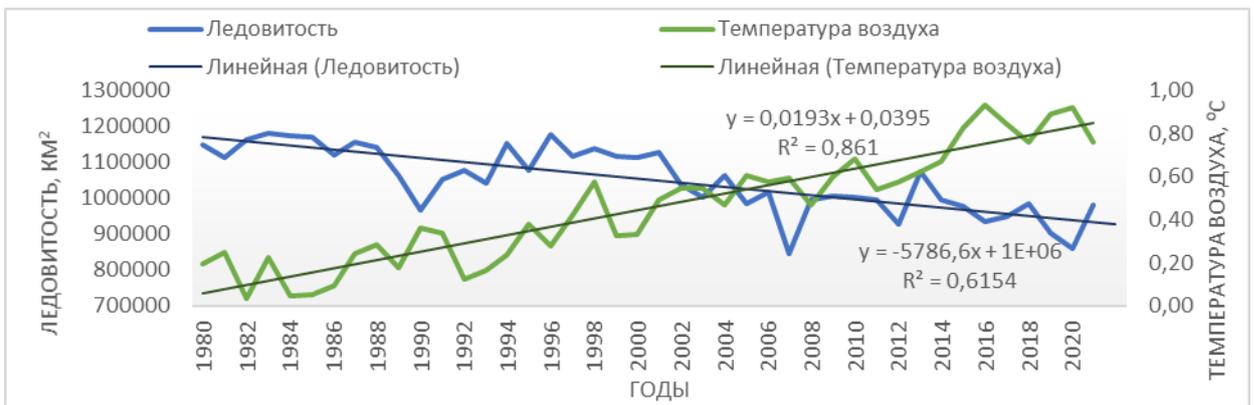


Рис.4.5. Межгодовой ход изменчивости ледовитости Восточно-Сибирского моря и глобальной температуры воздуха за период с 1980 по 2021 гг.

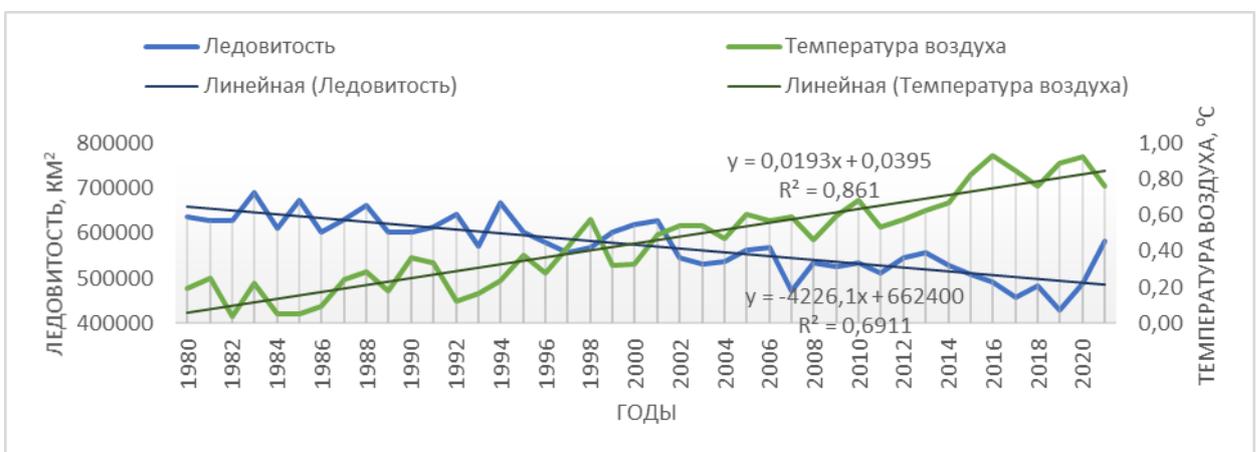


Рис.4.6. Межгодовой ход изменчивости ледовитости Чукотского моря и глобальной температуры воздуха за период с 1980 по 2021 гг.

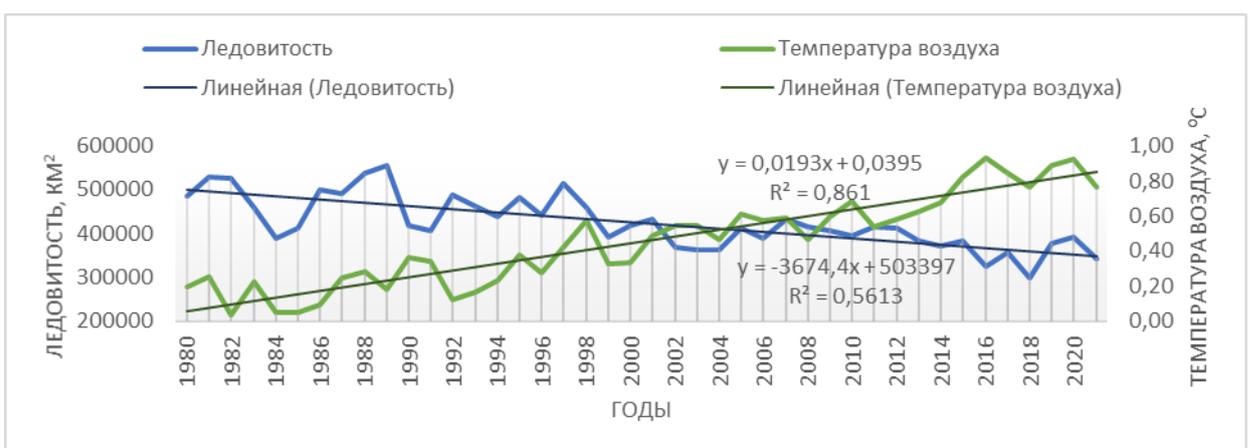


Рис.4.7. Межгодовой ход изменчивости ледовитости Гренландского моря и глобальной температуры воздуха за период с 1980 по 2021 гг.

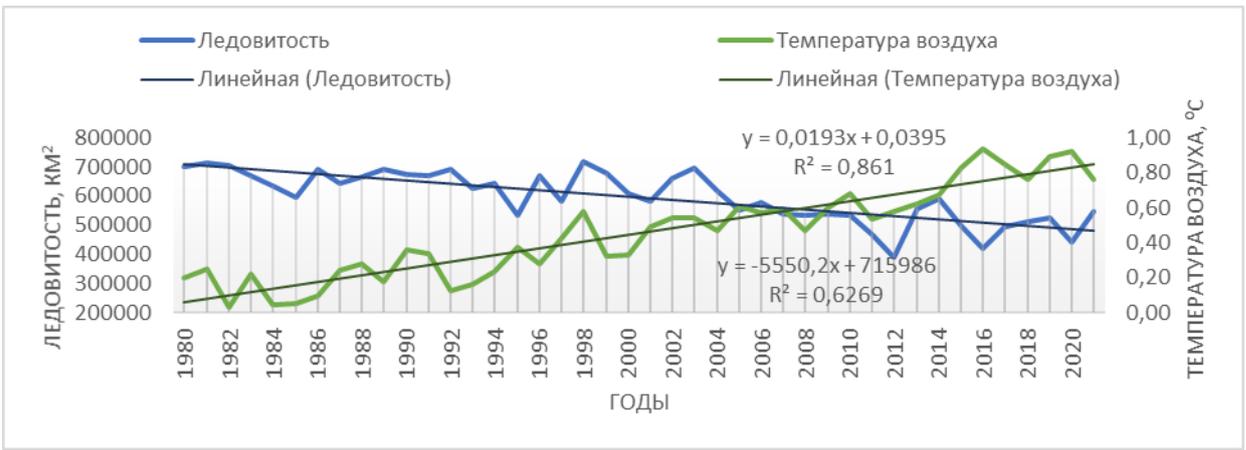


Рис.4.8. Межгодовой ход изменчивости ледовитости Карского моря и глобальной температуры воздуха за период с 1980 по 2021 гг.

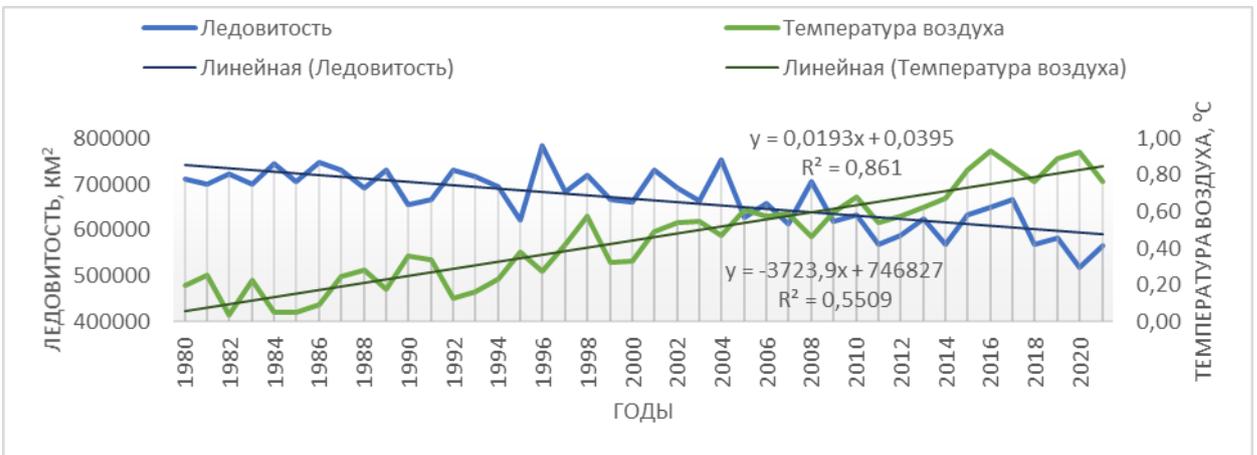


Рис.4.9. Межгодовой ход изменчивости ледовитости моря Лаптевых и глобальной температуры воздуха за период с 1980 по 2021 гг.

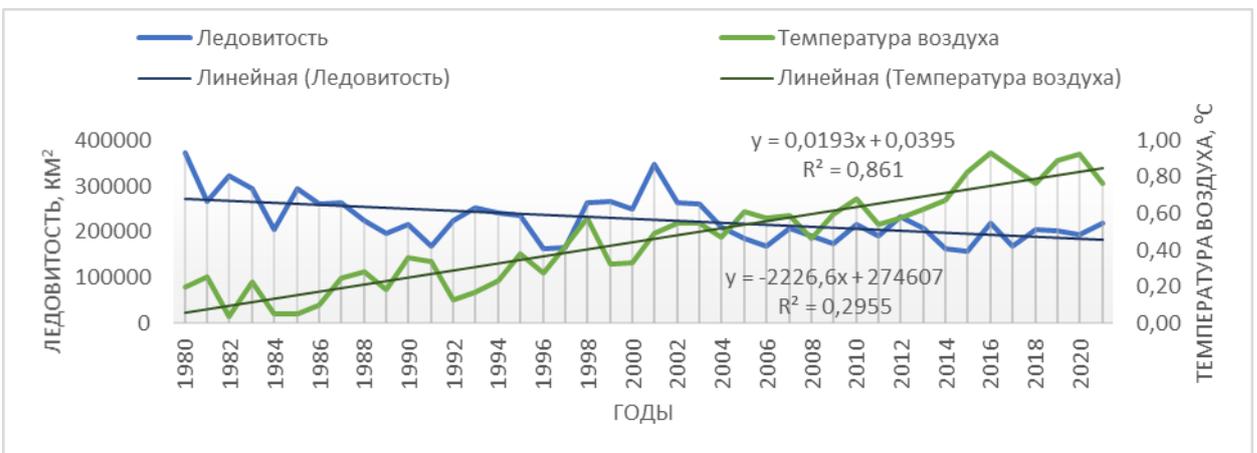


Рис. 4.10. Межгодовой ход изменчивости ледовитости Охотского моря и глобальной температуры воздуха за период с 1980 по 2021 гг.

Вышеперечисленные графики наглядно показывают, что во всех случаях площадь ледового покрова имеет тенденцию снижаться (об этом нам говорят отрицательные знаки в уравнениях линейного тренда), в то время, как глобальная температура воздуха повышается со временем.

Наиболее сильное сокращение ледового покрова наблюдается на акватории Баренцева моря, а также далее по убыванию следуют Восточно-Сибирское и Карское моря.

### 3.2. Расчет взаимокорреляционной функции (кросскорреляция).

Для того, чтобы определить наличие связей между двумя характеристиками при асинхронном взаимодействии применяется взаимокорреляционный анализ (далее – ВКФ).

Для расчета были взяты среднегодовые ряды глобальной температуры воздуха и преобразованные в максимумы значения ледовитости.

ВКФ представляет собой совокупность коэффициентов корреляции, каждый из них должен быть проверен на значимость.

#### 3.2.1 Баренцево море

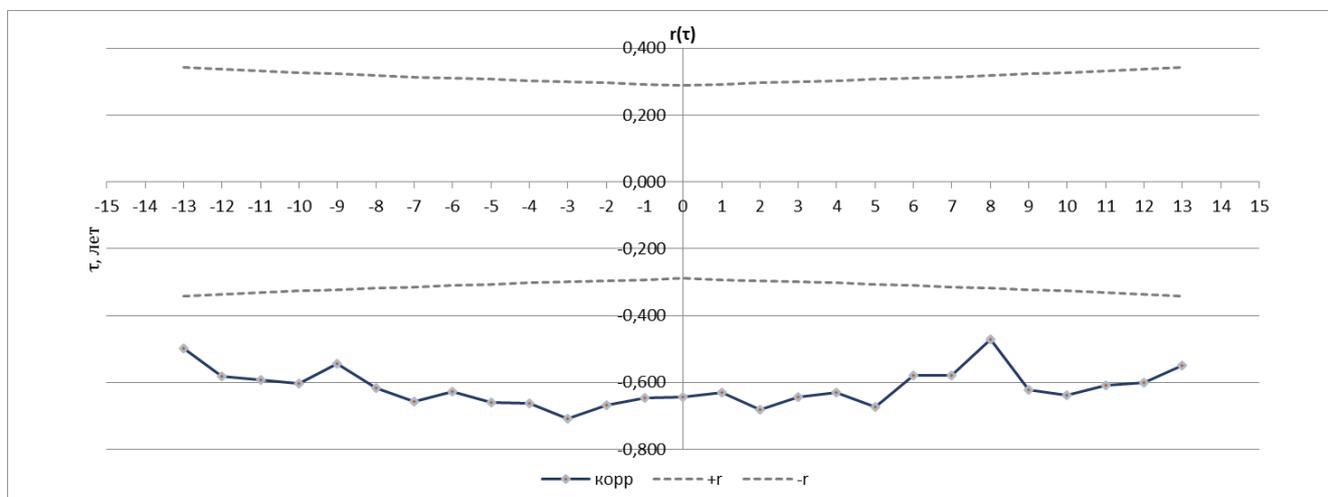


Рис. 5.1. Взаимнокорреляционная функция глобальной температуры воздуха и ледовитости Баренцева моря за период с 1980 по 2021 гг.

Поскольку на ВКФ присутствуют значимые коэффициенты корреляции на сдвигах, отличных от нуля, то можно сделать вывод, что глобальная температура воздуха и максимумы ледовитости связаны асинхронно.

Возможность прогноза.

Так как в ВКФ наблюдаются значимые коэффициенты корреляции на сдвигах, отличных от нуля, то можно сделать прогноз с заблаговременностью, равному сдвигу, при котором коэффициент корреляции значим. Например, при данных значениях, можно дать прогноз с заблаговременностью 2 года в положительном и в 3 года в отрицательном направлении. Так как прогноз в отрицательном направлении нас не интересует и в дальнейшем учитываться не будет, то прогноз ледовитости от температуры воздуха будет производиться с заблаговременностью 2 года.

Таблица 1. Прогностическая модель для Баренцева моря.

Вывод итогов						
Регрессионная статистика						
Множественный R	0,63					
R-квадрат	0,39					
Нормированный R-квадрат	0,38					
Стандартная ошибка	0,18					
Наблюдения	36					
Дисперсионный анализ						
	df	SS	MS	F	Значимость F	
Регрессия	1	0,75	0,75	22,12	0,00004	
Остаток	34	1,15	0,03			
Итого	35	1,89				
Кoeffициент парной регрессии - Значение t-статистики - Значение F-статистики - Нижние 95% - Верхние 95% - Нижние 95,0% - Верхние 95,0%						
Y-пересечение	1,10	0,13	8,46	0,00	0,84	1,37
Переменная X 1	-0,000001	0,0000002	-4,7037201	0,0000415	-0,0000013	-0,0000005

Оценка качества модели парной линейной регрессии:

Значимость коэффициентов регрессии (далее – КР):

$$t_a^* = -4,70, t_b^* = 8,46, t_{кр} = 2,02.$$

$t_a^* < t_{кр}$  - нулевая гипотеза принимается, коэффициент регрессии незначим.

$t_b^* > t_{кр}$  - нулевая гипотеза отвергается, коэффициент регрессии значимый.

Коэффициент детерминации  $r^2$  равен 0,39, что меньше 0,70 – качество модели плохое.

Адекватность модели по критерию Фишера:

$F^* = 22,2$ ,  $F_{кр} = 4,08$ .  $F^* > F_{кр}$  - что говорит о том, что нулевая гипотеза о равенстве дисперсий отвергается, регрессионная модель адекватна.

Стандартная ошибка модели.

Стандартная ошибка модели  $0,18^\circ\text{C}$ .  $\text{СКО} * 0,67 = 0,16^\circ\text{C}$ . Таким образом, стандартная ошибка модели несколько больше, чем  $\text{СКО} * 0,67$ .

Уравнение прогностической модели имеет вид:

$$T_{i+2} = -0,000001 * L + 1,10.$$

Коэффициенты регрессии значимые. Коэффициент детерминации равен 0,39 меньше, чем 0,70. Это говорит о том, что независимых переменных недостаточно для описания дисперсии исходного ряда. Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  показала, что модель адекватна. Стандартная ошибка модели  $0,18^\circ\text{C}$  больше, чем  $0,16^\circ\text{C}$  ( $0,67 * \text{СКО}$ ). Таким образом, можно сделать вывод, что полученная прогностическая модель имеет не очень хорошее качество, следовательно, и прогноз будет иметь не очень хорошее качество.

### 3.2.2. Море Бофорта.

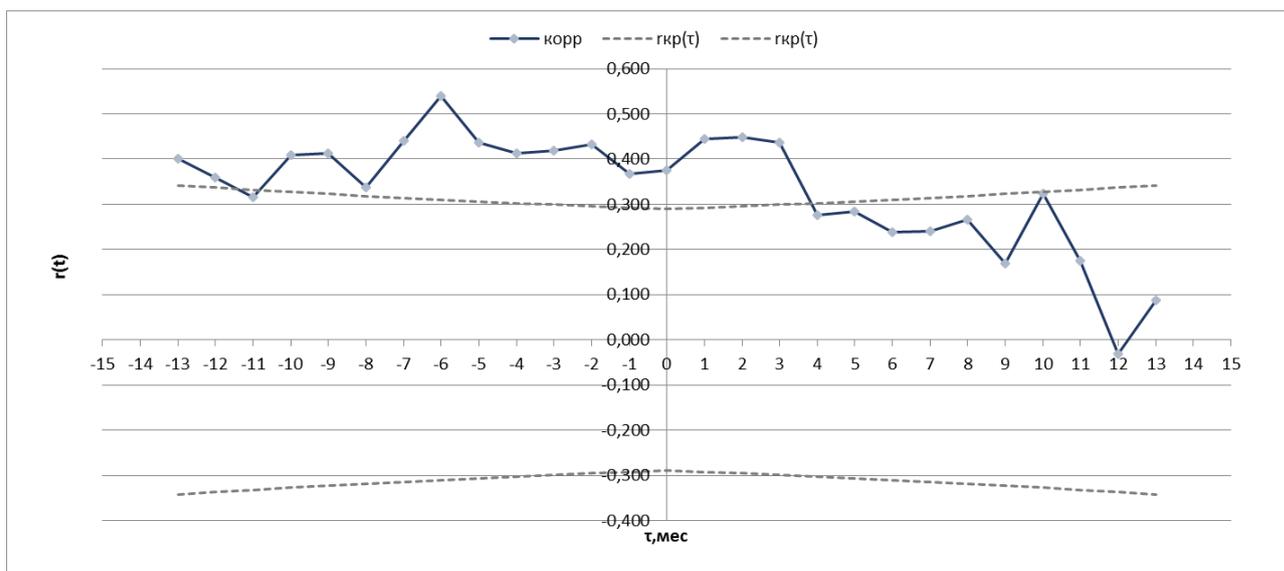


Рис. 5.2. Взаимнокорреляционная функция глобальной температуры воздуха и ледовитости моря Бофорта за период с 1980 по 2021 гг.

В случае с морем Бофорта также присутствуют значимые КК на сдвигах, отличных от нуля, значит, связь в данном случае также асинхронна.

Соответственно, далее можно сделать прогноз с заблаговременностью. Здесь наибольшее значение КК наблюдается на сдвиге 2 в положительном направлении. Таким образом, прогноз по температуре воздуха для ледовитости можно сделать с заблаговременностью 2 года.

Таблица 2. Прогностическая модель для моря Бофорта.

Вывод итогов									
<i>Регрессионная статистика</i>									
Множественный R	0,54								
R-квадрат	0,29								
Нормированный R	0,27								
Стандартная ошибка	0,20								
Наблюдения	36								
<i>Дисперсионный анализ</i>									
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>значимость F</i>				
Регрессия	1	0,55	0,55	13,96	0,00				
Остаток	34	1,34	0,04						
Итого	35	1,89							
	<i>Коэффициент</i>	<i>стандартная ошибка</i>	<i>статистика t</i>	<i>P-Значение</i>	<i>нижние 95%</i>	<i>верхние 95%</i>	<i>нижние 95,0%</i>	<i>верхние 95,0%</i>	
Y-пересечение	-16,91	4,66	-3,63	0,00	-26,39	-7,44	-26,39	-7,44	
Переменная X 1	0,00002	0,00001	3,74	0,00069	0,00001	0,00003	0,00001	0,00003	

Оценка качества модели парной линейной регрессии:

Значимость коэффициентов регрессии:

$$t_a^* = 3,74, t_b^* = -3,63, t_{кр} = 2,02.$$

$t_a^* > t_{кр}$  - нулевая гипотеза отвергается, коэффициент регрессии значимый.

$t_b^* < t_{кр}$  - нулевая гипотеза принимается, коэффициент регрессии незначим.

Коэффициент детерминации  $r^2$  равен 0,29, что меньше 0,70 – качество модели плохое.

Адекватность модели по критерию Фишера:

$F^* = 13,96, F_{кр} = 4,08. F^* > F_{кр}$  - что говорит о том, что нулевая гипотеза о равенстве дисперсий отвергается, регрессионная модель адекватна.

Стандартная ошибка модели.

Стандартная ошибка модели 0,20°C. СКО\*0,67=0,16°C. Таким образом, стандартная ошибка модели больше, чем СКО\*0,67.

Уравнение прогностической модели имеет вид:

$$Ta_{i+2} = -0,00002 * L + 16,91.$$

Коэффициент регрессии значим. Коэффициент детерминации равен 0,29 меньше, чем 0,70. Это говорит о том, что независимых переменных недостаточно для описания дисперсии исходного ряда. Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости  $\alpha=0,05$  показала, что модель адекватна. Стандартная ошибка модели  $0,20^{\circ}\text{C}$  больше, чем  $0,16^{\circ}\text{C}$  ( $0,67 * \text{СКО}$ ). Значит, как и в предыдущем случае, полученная прогностическая модель имеет не очень хорошее качество, следовательно, и прогноз будет недостоверным.

### 3.2.3. Море Баффина.

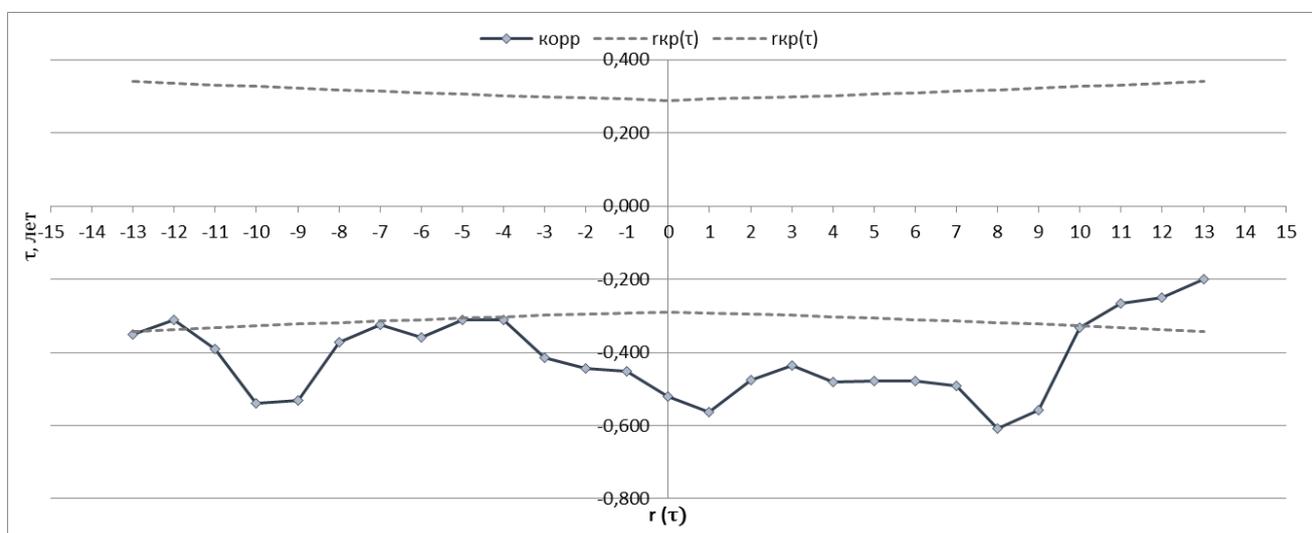


Рис. 5.3. Взаимнокорреляционная функция глобальной температуры воздуха и ледовитости моря Баффина за период с 1980 по 2021 гг.

На ВКФ моря Баффина наблюдаются значимые КК не на сдвиге нуля, так что связь глобальной температуры воздуха и ледовитости асинхронна.

При данных значениях, можно дать прогноз с заблаговременностью 1 год и 8 лет в положительном. Из всех коэффициентов корреляции наибольший находится на сдвиге 8 лет. Следовательно, наиболее оптимальный вариант делать прогноз ледовитости по температуре воздуха с заблаговременностью 8 лет.

Таблица 3. Прогностическая модель для моря Баффина.

ВЫВОД ИТОГОВ									
<i>Регрессионная статистика</i>									
Множественный R	0,36								
R-квадрат	0,13								
Нормированный R-ква	0,10								
Стандартная ошибка	0,22								
Наблюдения	36								
<i>Дисперсионный анализ</i>									
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>значимость F</i>				
Регрессия	1	0,25	0,25	5,06	0,03				
Остаток	34	1,65	0,05						
Итого	35	1,89							
<i>Коэффициентная статистика - Значения ниже 95% верхние 95% нижние 95% средние 95% С</i>									
Y-пересечение	1,14	0,28	4,02	0,00	0,56	1,71	0,56	1,71	
Переменная X 1	-0,000001	0,000000	-2,25	0,03	-0,000001	0,000000	-0,000001	0,000000	

Оценка качества модели парной линейной регрессии:

Значимость коэффициентов регрессии:

$$t_a^* = -2,25, t_b^* = 4,02, t_{кр} = 2,02.$$

$t_a^* < t_{кр}$  - нулевая гипотеза принимается, коэффициент регрессии незначим.

$t_b^* > t_{кр}$  - нулевая гипотеза отвергается, коэффициент регрессии значимый.

Коэффициент детерминации  $r^2$  равен 0,19, что меньше 0,70 – качество модели плохое.

Адекватность модели по критерию Фишера:

$F^* = 5,06, F_{кр} = 4,08. F^* > F_{кр}$  - что говорит о том, что нулевая гипотеза о равенстве дисперсий отвергается, регрессионная модель адекватна.

Стандартная ошибка модели.

Стандартная ошибка модели  $0,22^\circ\text{C}$ .  $\text{СКО} * 0,67 = 0,16^\circ\text{C}$ . Таким образом, стандартная ошибка модели больше, чем  $\text{СКО} * 0,67$ .

Уравнение прогностической модели имеет вид:

$$Ta_{i+2} = -0,000001 * L + 1,14.$$

Коэффициент регрессии значим. Коэффициент детерминации равен 0,19 меньше, чем 0,70. Это говорит о том, что независимых переменных недостаточно для описания дисперсии исходного ряда. Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости  $\alpha=0,05$  показала, что модель адекватна. Стандартная ошибка модели  $0,22^{\circ}\text{C}$  больше, чем  $0,16^{\circ}\text{C}$  ( $0,67 * \text{СКО}$ ). Значит, как и в предыдущем случае, полученная прогностическая модель имеет не очень хорошее качество, следовательно, и прогноз будет недостоверным.

### 3.2.4. Берингово море.

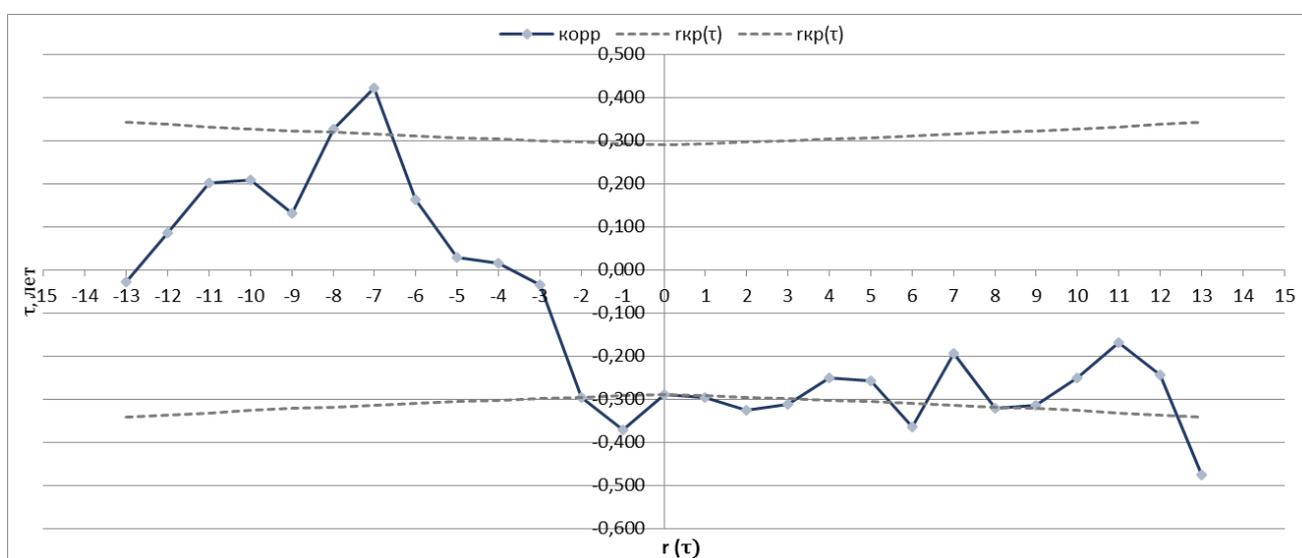


Рис. 5.4. Взаимнокорреляционная функция глобальной температуры воздуха и ледовитости Берингова моря за период с 1980 по 2021 гг.

Связь глобальной температуры воздуха и ледовитости Берингова моря асинхронна, прогноз можно сделать с заблаговременностью 6 лет в положительном направлении и 13 лет в отрицательном. Наиболее подходящим будет прогноз с заблаговременностью 13 лет в отрицательном направлении, т.к. именно на этом сдвиге КК наибольший.

Таблица 4. Прогностическая модель для моря Баффина.

Вывод итогов					
<b>Регрессионная статистика</b>					
Множественный R	0,16				
R-квадрат	0,03				
Нормированный R-кв	0,00				
Стандартная ошибка	0,23				
Наблюдения	36				
<b>Дисперсионный анализ</b>					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>значимость F</i>
Регрессия	1	0,05	0,05	0,93	0,34
Остаток	34	1,84	0,05		
Итого	35	1,89			
<b>Коэффициентная статистика</b>					
	<i>t</i> -Значение	<i>нижние 95%</i>	<i>верхние 95%</i>	<i>нижние 95,0%</i>	<i>верхние 95,0%</i>
Y-пересечение	0,30	0,22	1,38	0,18	-0,14 0,74
Переменная X 1	0,0000004	0,0000004	0,96	0,34	-0,0000004 0,0000012 -0,0000004 0,0000012

Оценка качества модели парной линейной регрессии:

Значимость коэффициентов регрессии:

$$t_a^* = 0,96, t_b^* = 1,38, t_{кр} = 2,02.$$

$t_a^* < t_{кр}$  - нулевая гипотеза принимается, коэффициент регрессии незначим.

$t_b^* < t_{кр}$  - нулевая гипотеза принимается, коэффициент регрессии незначимый.

Коэффициент детерминации  $r^2$  равен 0,03, что меньше 0,70 – качество модели плохое.

Адекватность модели по критерию Фишера:

$F^* = 0,93, F_{кр} = 4,08. F^* < F_{кр}$  - что говорит о том, что нулевая гипотеза о равенстве дисперсий принимается, регрессионная модель неадекватна.

Стандартная ошибка модели.

Стандартная ошибка модели 0,23°C. СКО\*0,67=0,16°C. Таким образом, стандартная ошибка модели больше, чем СКО\*0,67.

Уравнение прогностической модели имеет вид:

$$Ta_{i+2} = -0,0000004 * L + 0,30.$$

Коэффициент регрессии значим. Коэффициент детерминации равен 0,03 меньше, чем 0,70. Это говорит о том, что независимых переменных недостаточно для описания дисперсии исходного ряда. Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости  $\alpha=0,05$  показала, что модель неадекватна. Стандартная ошибка модели  $0,23^{\circ}\text{C}$  больше, чем  $0,16^{\circ}\text{C}$  ( $0,67 * \text{СКО}$ ). Следовательно, в случае с морем Баффина прогностическая модель имеет плохое качество и прогноз в этом случае не имеет смысла.

### 3.2.5. Восточно-Сибирское море.

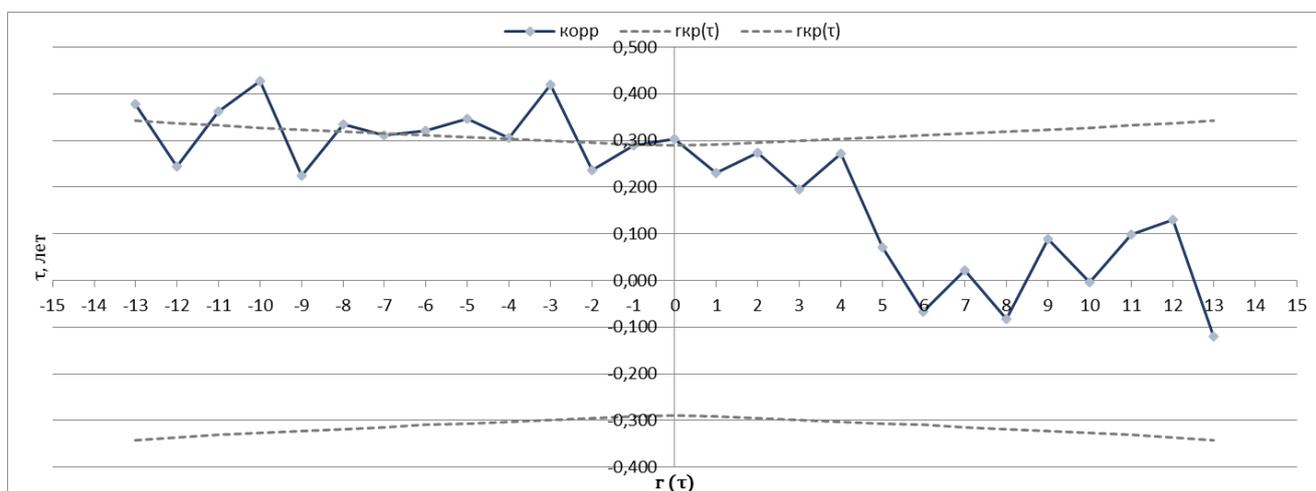


Рис. 5.5. Взаимнокорреляционная функция глобальной температуры воздуха и ледовитости Восточно-Сибирского моря за период с 1980 по 2021 гг.

В случае с Восточно-Сибирским морем, на ВКФ присутствуют значимые КК на сдвигах, отличных от нуля, значит, связь в данном случае асинхронна.

Прогноз возможен только в отрицательном направлении с заблаговременностью 3 и 10 лет. Таким образом, прогностическая модель для Восточно-Сибирского моря не имеет смысла быть.

### 3.2.6. Чукотское море.

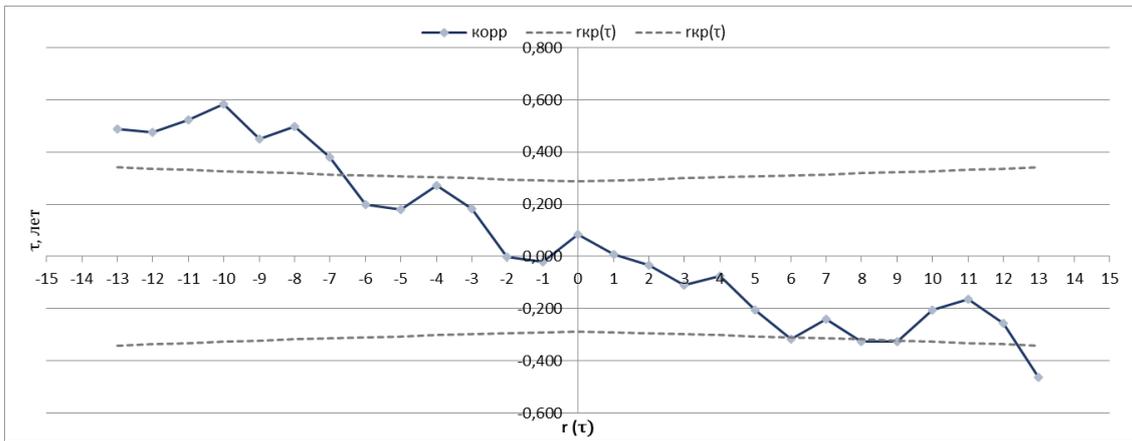


Рис. 5.6. Взаимнокорреляционная функция глобальной температуры воздуха и ледовитости Чукотского моря за период с 1980 по 2021 гг.

Связь асинхронна, заблаговременность только в отрицательном направлении 10 и 8 лет. Прогностическая модель не рассматривалась ввиду отсутствия значимых КК в положительном направлении.

### 3.2.7. Гренландское море.

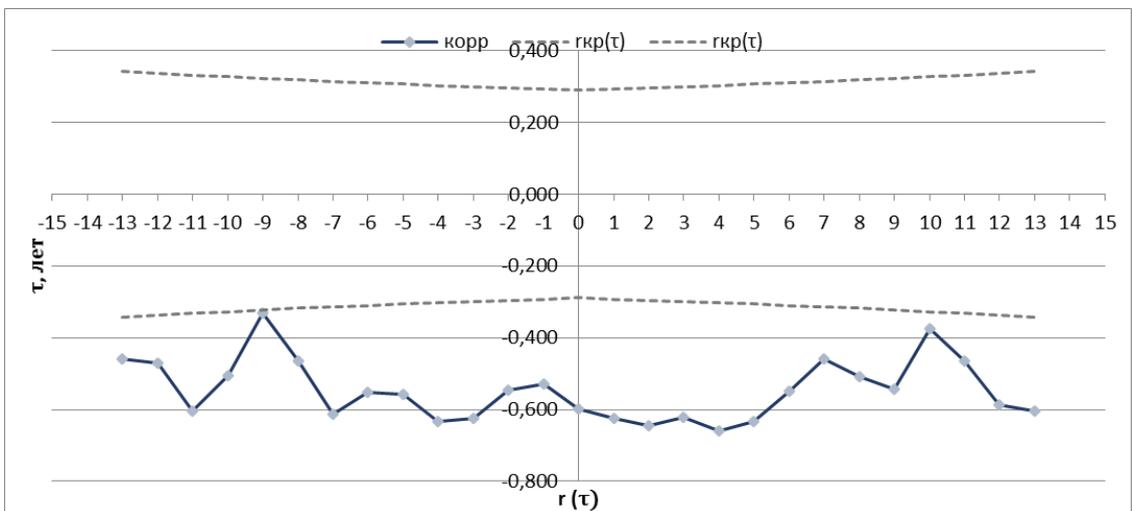


Рис. 5.7. Взаимнокорреляционная функция глобальной температуры воздуха и ледовитости Гренландского моря за период с 1980 по 2021 гг.

На ВКФ глобальной температуры воздуха и ледовитости Гренландского моря наблюдаются значимые коэффициенты корреляции, на сдвигах, отличных от нуля, т.е. связь в данном случае асинхронна.

Прогноз можно сделать с заблаговременностью 4 года в положительном направлении. Значит прогноз ледовитости в Гренландском море по температуре воздуха с заблаговременностью 4 года оптимален.

Таблица 5. Прогностическая модель для Гренландского моря.

ВЫВОД ИТОГОВ									
<i>Регрессионная статистика</i>									
Множественный R	0,55								
R-квадрат	0,31								
Нормированный R-квадрат	0,29								
Стандартная ошибка	0,20								
Наблюдения	36								
<i>Дисперсионный анализ</i>									
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>значимость F</i>				
Регрессия	1	0,58	0,58	15,00	0,00				
Остаток	34	1,31	0,04						
Итого	35	1,89							
<i>Коэффициентная статистика - значения ниже 95% верхние 95% нижние 95% средние 95% средние 95%</i>									
Y-пересечение	1,42	0,24	5,96	0,00	0,94	1,90	0,94	1,90	2,20
Переменная X 1	-0,000001	0,000000	-3,87	0,0005	-0,000002	-0,000001	-0,000002	-0,000001	-0,000002

Оценка качества модели парной линейной регрессии:

Значимость КР:

$$t_a^* = -3,87, t_b^* = 5,96, t_{кр} = 2,02.$$

$t_a^* < t_{кр}$  - нулевая гипотеза принимается, коэффициент регрессии незначим.

$t_b^* > t_{кр}$  - нулевая гипотеза отвергается, коэффициент регрессии значимый.

Коэффициент детерминации  $r^2$  равен 0,31, что меньше 0,70 – качество модели плохое.

Адекватность модели по критерию Фишера:

$F^* = 15,0$ ,  $F_{кр} = 4,08$ .  $F^* > F_{кр}$  - что говорит о том, что нулевая гипотеза о равенстве дисперсий отвергается, регрессионная модель адекватна.

Стандартная ошибка модели.

Стандартная ошибка модели  $0,20^\circ\text{C}$ .  $\text{СКО} * 0,67 = 0,16^\circ\text{C}$ . Таким образом, стандартная ошибка модели несколько больше, чем  $\text{СКО} * 0,67$ .

Уравнение прогностической модели имеет вид:

$$T_{i+2} = -0,000001 * L + 1,42.$$

Коэффициенты регрессии значимые. Коэффициент детерминации равен 0,31 меньше, чем 0,70. Это говорит о том, что независимых переменных недостаточно для описания дисперсии исходного ряда. Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  показала, что модель адекватна. Стандартная ошибка модели  $0,20^\circ\text{C}$  больше, чем  $0,16^\circ\text{C}$  ( $0,67 * \text{СКО}$ ). Таким образом, можно сделать вывод, что полученная прогностическая модель имеет не очень хорошее качество, следовательно, и прогноз будет недостоверным.

### 3.2.8. Карское море.

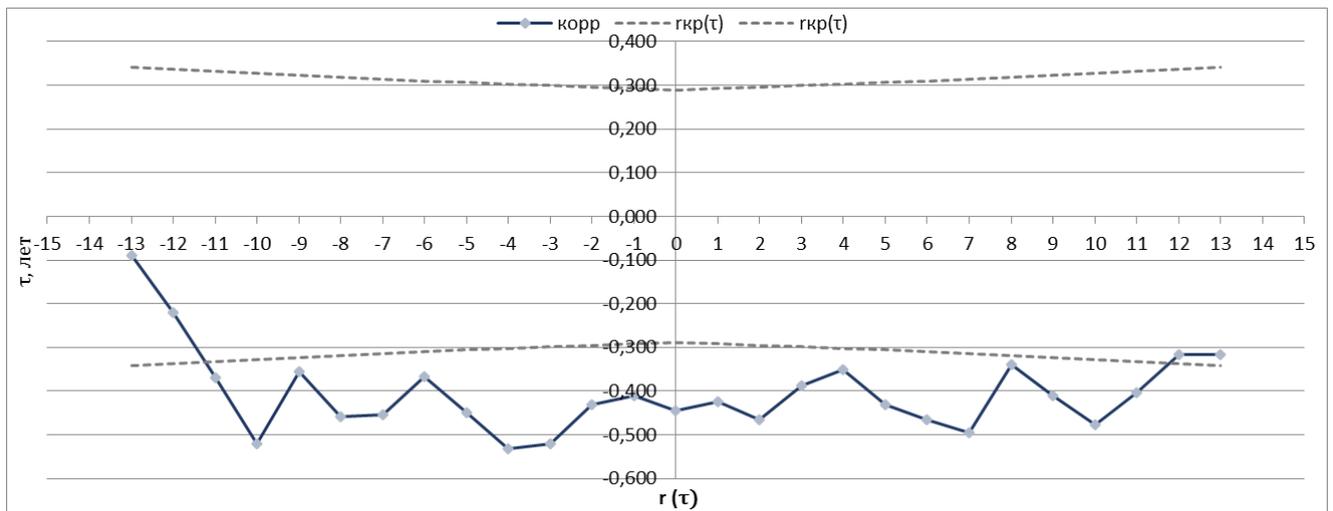


Рис. 5.8. Взаимнокорреляционная функция глобальной температуры воздуха и ледовитости Карского моря за период с 1980 по 2021 гг.

На ВКФ глобальной температуры воздуха и ледовитости Карского моря наблюдаются значимые коэффициенты корреляции, на сдвигах, отличных от нуля, т.е. связь в данном случае асинхронна.

Прогноз можно сделать с заблаговременностью 7 и 10 лет в положительном направлении. На сдвиге 7 наибольший коэффициент корреляции, значит прогноз ледовитости Карского моря с заблаговременностью 7 лет в положительном направлении оптимален для прогноза.

Таблица 6. Прогностическая модель для Карского моря.

ВЫВОД ИТОГОВ									
<i>Регрессионная статистика</i>									
Множественный R	0,37								
R-квадрат	0,14								
Нормированный R-кв:	0,11								
Стандартная ошибка	0,22								
Наблюдения	36								
<i>Дисперсионный анализ</i>									
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>значимость F</i>				
Регрессия	1	0,26	0,26	5,31	0,03				
Остаток	34	1,64	0,05						
Итого	35	1,89							
<i>Коэффициентная статистика - Значения ниже 95% Верхние 95% Нижние 95% Средние 95%</i>									
Y-пересечение	3,80	1,43	2,66	0,01	0,90	6,71	0,90	6,71	
Переменная X 1	-0,000004	0,000002	-2,31	0,027375	-0,00001	-0,0000004	-0,00001	0,000000	

Оценка качества модели парной линейной регрессии:

Значимость КР:

$$t_a^* = -2,31, t_b^* = 2,66, t_{кр} = 2,02.$$

$t_a^* < t_{кр}$  - нулевая гипотеза принимается, коэффициент регрессии незначим.

$t_b^* > t_{кр}$  - нулевая гипотеза отвергается, коэффициент регрессии значимый.

Коэффициент детерминации  $r^2$  равен 0,14, что меньше 0,70 – качество модели плохое.

Адекватность модели по критерию Фишера:

$F^* = 5,31, F_{кр} = 4,08. F^* > F_{кр}$  - что говорит о том, что нулевая гипотеза о равенстве дисперсий отвергается, регрессионная модель адекватна.

Стандартная ошибка модели.

Стандартная ошибка модели 0,22°С. СКО\*0,67=0,16°С. Таким образом, стандартная ошибка модели несколько больше, чем СКО\*0,67.

Уравнение прогностической модели имеет вид:

$$T_{a_{i+2}} = -0,000004 * L + 3,80.$$

Коэффициенты регрессии значимые. Коэффициент детерминации равен 0,14 меньше, чем 0,70. Это говорит о том, что независимых переменных недостаточно для описания дисперсии исходного ряда. Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости  $\alpha=0,05$  показала, что модель адекватна. Стандартная ошибка модели  $0,22^{\circ}\text{C}$  больше, чем  $0,16^{\circ}\text{C}$  ( $0,67 * \text{СКО}$ ). Таким образом, можно сделать вывод, что полученная прогностическая модель имеет не очень хорошее качество, следовательно, и прогноз для Карского моря будет недостоверным.

### 3.2.9. Море Лаптевых.

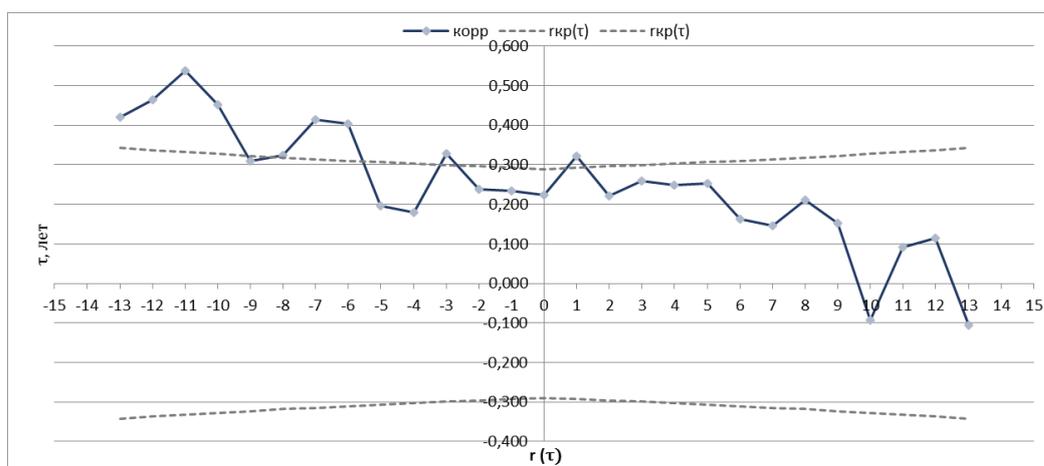


Рис. 5.9. Взаимнокорреляционная функция глобальной температуры воздуха и ледовитости моря Лаптевых за период с 1980 по 2021 гг.

Поскольку на ВКФ моря Лаптевых присутствуют значимые коэффициенты корреляции на сдвигах, отличных от нуля, то можно сделать вывод, что глобальная температура воздуха и максимумы ледовитости связаны асинхронно.

Прогноз можно сделать только в отрицательном направлении с заблаговременностью 11 лет. Так как в этом случае нет значимых

коэффициентов корреляции прогностическая модель для моря Лаптевых не имеет смысла.

### 3.2.10. Охотское море.

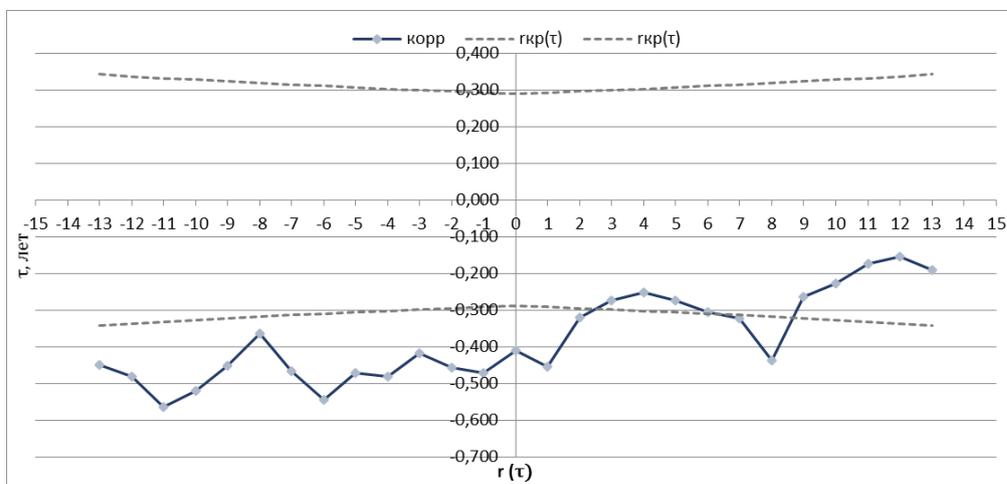


Рис. 5.10. Взаимнокорреляционная функция глобальной температуры воздуха и ледовитости Охотского моря за период с 1980 по 2021 гг.

Связь глобальной температуры воздуха и ледовитости Охотского моря асинхронна, прогноз можно делать с заблаговременностью 1 и 8 лет в положительном направлении. Оптимальным вариантом будет прогноз ледовитости Охотского моря по температуре воздуха с заблаговременностью 1 и 8 лет в положительном направлении, так как на этом сдвиге коэффициент корреляции наибольший.

Таблица 7. Прогностическая модель для Охотского моря.

ВЫВОД ИТОГОВ									
<i>Регрессионная статистика</i>									
Множественный R	0,55								
R-квадрат	0,30								
Нормированный R-квадрат	0,28								
Стандартная ошибка	0,20								
Наблюдения	36								
<i>Дисперсионный анализ</i>									
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>значимость F</i>				
Регрессия	1	0,56	0,56	14,40	0,00				
Остаток	34	1,33	0,04						
Итого	35	1,89							
<i>Коэффициент</i>									
<i>парная статистика</i>	<i>Значение</i>	<i>нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>	<i>нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>	<i>нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>
Y-пересечение	1,11	0,16	6,86	0,00	0,78	1,43	0,78	1,43	1,43
Переменная X 1	-0,0000008	0,0000002	-3,79	0,0006	-0,0000012	-0,0000004	-0,0000012	-0,0000004	-0,0000004

Оценка качества модели парной линейной регрессии:

Значимость КР:

$$t_a^* = -3,79, t_b^* = 6,86, t_{кр} = 2,02.$$

$t_a^* < t_{кр}$  - нулевая гипотеза принимается, коэффициент регрессии незначим.

$t_b^* > t_{кр}$  - нулевая гипотеза отвергается, коэффициент регрессии значимый.

Коэффициент детерминации  $r^2$  равен 0,30, что меньше 0,70 – качество модели плохое.

Адекватность модели по критерию Фишера:

$F^* = 14,40, F_{кр} = 4,08. F^* > F_{кр}$  - что говорит о том, что нулевая гипотеза о равенстве дисперсий отвергается, регрессионная модель адекватна.

Стандартная ошибка модели.

Стандартная ошибка модели  $0,20^\circ\text{C}$ .  $\text{СКО} * 0,67 = 0,16^\circ\text{C}$ . Таким образом, стандартная ошибка модели несколько больше, чем  $\text{СКО} * 0,67$ .

Уравнение прогностической модели имеет вид:

$$T_{i+1} = -0,0000008 * L_{i+1} + 11.$$

Коэффициенты регрессии значимые. Коэффициент детерминации равен 0,30 меньше, чем 0,70. Это говорит о том, что независимых переменных недостаточно для описания дисперсии исходного ряда. Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости  $\alpha=0,05$  показала, что модель адекватна. Стандартная ошибка модели  $0,20^{\circ}\text{C}$  больше, чем  $0,16^{\circ}\text{C}$  ( $0,67 * \text{СКО}$ ). Таким образом, можно сделать вывод, что полученная прогностическая модель имеет не очень хорошее качество, следовательно, и прогноз для Охотского моря будет недостоверным.

В результате расчетов сделаем вывод:

Прогноз ледовитости по глобальной температуре воздуха возможен с разной заблаговременностью (кроме моря Лаптевых, Чукотского и Восточно-Сибирского, т.к. не была сделана проверка на качество модели из-за отрицательного направления заблаговременности), но проверка на качество прогностической модели показала, что получившиеся результаты будут иметь не очень хорошее качество, то есть полученный прогноз будет недостоверным.

Для удобства, моря, для которых возможен прогноз были обозначены цветами на общей карте СЛЮ:



Рис.6. Выделенные цветом моря с возможностью прогноза с помощью ВКФ (Баренцево, Карское, Берингово, Охотское, Гренландское, Бофорта и Баффина моря)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной выпускной квалификационной работы была исследована изменчивость ледовитости Арктических морей, в заключении которой можно сделать некоторые выводы.

Снижение ледовитости исследуемых морей СЛО, а также близлежащих морей (Берингово и Охотское) имеет неоспоримый тренд. Рисунки 4.1 - 4.10 наглядно показали, что, при повышении температуры воздуха ледовитость снижается со временем. Наиболее сильное сокращение ледового покрова наблюдается на акватории Баренцева, Карского и Восточно-Сибирского морей.

Расчет и анализ связи изменчивости площади морского льда и температуры воздуха показал, что значимых связей практически не наблюдается, что может говорить о более значимых связях ледовитости с другими гидрометеорологическими характеристиками. В связи с этим, прогноз ПМЛ по температуре воздуха возможен, но не надежен. По мнению некоторых авторов, [10] на снижение арктических льдов влияет атмосферный перенос тепла по направлению к полюсу. Также, по мнению других [11], на потепление влияет индекс Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО), при котором теплая вода движется на север в составе Северо-Атлантического течения.

То есть, не всегда изменения температуры воздуха или воды прямо влияют на изменения ПМЛ, существуют ситуации, когда изменчивость ледовитости не определяется только изменениями температуры.

Таким образом, для того, чтобы получить хорошие и адекватные прогностические модели нужно найти и определить другие гидрометеорологические характеристики, которые будут иметь более тесную связь с ледовитостью в Арктическом регионе.

## Список литературы:

1. Arctic Ocean // Britannica: сайт. – URL: <https://www.britannica.com/place/Arctic-Ocean> (дата обращения: 14.05.2022)
2. Saeed, Ng Naima, Adolf К.У. Opportunities and challenges of the opening of the Arctic Ocean for Norway / Naima, Adolf К.У. Saeed, Ng // Maritime Transport and Regional Sustainability. – 2020. – № . – С. 209-221.
3. Arctic Ocean // The World Factbook : сайт. – URL: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/oceans/arctic-ocean/> (дата обращения: 14.05.2022)
4. Северный Ледовитый океан // Большая российская энциклопедия : сайт. – URL: <http://dev.bigenc.ru/geography/text/3543901#:~:text=С.%20Л.%20о.%20хорошо%20изолирован,по%20параллели%2070%20с.%20ш> (дата обращения: 14.05.2022)
5. Северный ледовитый океан и антарктические воды // Полная энциклопедия: сайт. – URL: <https://www.polnaja-jenciklopedija.ru/zhizn-okeana/severnyu-ledovityu-okean-i-antarkticheskie-vody.html> (дата обращения: 14.05.2022)
6. Рельеф дна Северного Ледовитого океана — карта и краткое описание // Природа Мира: сайт. – URL: <https://natworld.info/nauki-o-prirode/relef-dna-severnogo-ledovitogo-okeana-karta-i-osobennosti-kratko-geografiya> (дата обращения: 14.05.2022)
7. Arctic Ocean // Earth Eclipse: сайт. – URL: <https://earthclipse.com/science/geography/arctic-ocean.html> (дата обращения: 14.05.2022)
8. Ozhigin, V.K. & Ingvaldsen, Randi & Loeng, Harald & Boitsov, V. & Karsakov, Alexey. (2011). Introduction to the Barents Sea. The Barents Sea Ecosystem: Russian-Norwegian Cooperation in Science and Management. 315-328.
9. Barents-Sea// Britannica: сайт. – URL: <https://www.britannica.com/place/Barents-Sea> Accessed 4 June 2022.

10. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике / Г.В. Алексеев // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – № 1. – С. 11-26.
11. Малинин В.Н. О ПРИЧИНАХ ПЕРВОГО ПОТЕПЛЕНИЯ АРКТИКИ В XX СТОЛЕТИИ / В.Н. Малинин, П.А. Вайновский // УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ РГГМУ. – 2018. – № 53. – С. 34-55.
12. Kara Sea // Britannica: сайт. – URL: <https://www.britannica.com/place/Kara-Sea>. Accessed 1 June 2022.
13. Laptev Sea // Britannica: сайт. – URL: <https://www.britannica.com/place/Laptev-Sea>. Accessed 1 June 2022.
14. East Siberian Sea // Britannica: сайт. – URL: <https://www.britannica.com/place/East-Siberian-Sea>. Accessed 1 June 2022.
15. Chukchi Sea // Britannica: сайт. – URL: <https://www.britannica.com/place/Chukchi-Sea>. Accessed 1 June 2022.
16. Beaufort Sea // Britannica: сайт. – URL: <https://www.britannica.com/place/Beaufort-Sea>. Accessed 4 June 2022.
17. Greenland Sea // Britannica: сайт. – URL: <https://www.britannica.com/place/Greenland-Sea>. Accessed 4 June 2022.
18. Historic low sea ice in the Bering Sea // Global Climate Change: сайт. – URL: <https://climate.nasa.gov/news/2726/historic-low-sea-ice-in-the-bering-sea/> (дата обращения: 04.05.2022)
19. Radchenko, Vladimir & Dulepova, E. & Figurkin, A. & Katugin, Oleg & K., Ohshima & Nishioka, Jun & S.M., McKinnell & A.T., Tsoy. (2010). Sea of Okhotsk.
20. Baffin Bay // Britannica: сайт. – URL: <https://www.britannica.com/place/Baffin-Bay> Accessed 4 June 2022.

21. Geography of Russia: сайт. – URL: <https://geographyofrussia.com/wp-content/uploads/2011/01/arctic-ocean-map.gif> (дата обращения: 03.05.2022)
22. Campos, Camila & Vredenburg, Myriel. (2018). The Physical System of the Arctic Ocean and Subarctic Seas in a Changing Climate. 25-40
23. Met Office // Sea ice in the climate system : сайт. – URL: <https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/cryosphere-oceans/sea-ice/index> (дата обращения: 04.05.2022)
24. Anderson, Leif & Macdonald, Robie. (2015). Observing the Arctic Ocean carbon cycle in a changing environment. Polar Research. 34. 10.3402/polar.v34.26891.
25. National Snow & Ice Data Centre (NSIDC) : сайт. – URL: [https://nsidc.org/data/seaice\\_index/archives](https://nsidc.org/data/seaice_index/archives) (дата обращения: 23.04.2022)
26. Climate Research Unit (University of East Anglia) : сайт. – URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/> (дата обращения: 23.04.2022)