

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(РГГМУ)

Допущена к защите
Зав. Кафедрой к.ф.-м.н., доцент
_____ Т.Р.Еремина
____.06.2016

Кафедра промышленной океанологии и
Охраны природных вод

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ
Изменчивость ледового покрова Карского
морья

Выполнила А.В. Старцева
гр. О – 65
Проверил д.г.н., профессор
В.Н. Малинин

Санкт-Петербург 2016

СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕДОВИТОСТИ КАРСКОГО МОРЯ	6
1.1 Общие сведения о гидрометеорологическом режиме Карского моря	6
1.2 Ледовые условия Карского моря	14
1.2.1 Основные элементы сезонной изменчивости ледяных условий в Карском море	15
1.2.2 Различия ледовых условий в юго-западной и северо-восточной частях Карского моря	19
1.2.3 Пространственные особенности очищения акватории	23
Глава 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ СТАТИСТИЧЕСКО- ГО АНАЛИЗА	28
2.1 Исходные данные	28
2.2 Методы анализа исходных данных	28
2.2.1 Первичные статистики	29
2.2.2 Корреляционный анализ	30
2.2.3 Выделение и анализ трендовой компоненты	31
2.2.4 Гармонический анализ	35
Глава 3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВИТОСТИ КАРСКОГО МОРЯ	40
3.1 Климатическая изменчивость состояния ледяного покрова	40
3.2 Выделение и анализ трендовой компоненты в ледовитости Карско- го моря	45
3.3 Гармонический анализ	53
3.4 Прогноз ледовитости Карского моря до 2020 года	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	64
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	66

СОКРАЩЕНИЯ

ГС – генеральная совокупность;

АКФ – автокорреляционная функция;

БПФ – быстрое преобразование Фурье;

ЭФР – эмпирическая функция распределения

ВВЕДЕНИЕ

«Северный океан – есть пространное поле,
где... усугубиться может российская
слава, соединенная с беспримерною
пользою»

М. В. Ломоносов

В настоящее время интерес нашей страны в Арктическом регионе значительно возрос. На фоне периода, так называемого «глобального потепления», выявляется тенденция к сокращению ледовитости арктических морей. Это открывает широкие возможности для освоения данного региона. На ближайшие десятилетия стоят задачи связанные с освоением ресурсов, добычей и разведкой углеводородов на шельфе, развитие военной и гражданской инфраструктур, обеспечение безопасного плавания в ледовых условиях по Северному морскому пути. Для решения всех этих задач, наравне с оперативной гидрометеорологической информацией, необходимы знания ледового режима Арктических морей, а так же долговременный прогноз ледовых условий для планирования работ в регионе.

Карское море – одно из наиболее интенсивно исследуемых морей арктического региона России. В регионе Карского моря в настоящее время разворачиваются крупнейшие проекты, по добыче нефти и газа. На территории Карского моря располагаются буровые платформы таких крупных российских компаний, как «Норильский никель», «Газпром нефть» и «Роснефть».

Так же море относится к северному морскому пути, что говорит о постоянном транзите.

Активному интересу к Карскому морю способствует потепление климата и улучшение метеорологических и ледовых условий в последние десятилетия. В докладе «Изменения климата и их последствия на территории РФ», опубликованном Росгидрометом в 2014 году, говорится, что на территории России скорость потепления климата превышает мировые показатели в два

раза.

В связи с этим целью данной работы является изучение межгодовой и межсезонной изменчивости в ледовитости Карского моря. Представляющего наибольший интерес среди морей арктического региона, из за сложного ледового режима.

Объектом для исследования в данной работе является Карское море, а предметом исследования непосредственно его ледовитость.

В работе были поставлены следующие задачи:

- формирование среднемесячных и среднегодовых временных рядов ледовитости Карского моря;

- получение сведений о средних значениях ледовитости за весь представленный период и отклонениях от средних оценок при помощи первичного статистического анализа.

- выявление временных трендов в среднегодовых и среднемесячных значениях ледовитости;

- выявление гармонических колебаний в ледовитости Карского моря;

- получение прогноза ледовой изменчивости до 2020 года.

Глава 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕДОВИТОСТИ КАРСКОГО МОРЯ

Карское море – окраинное море Северного Ледовитого океана. Оно омывает берега северо-восточной части Европы, Западной Сибири и полуострова Таймыр. На западе море ограничено островом Вайгач и островами архипелага Новая Земля и соединено с Баренцевым морем проливами Югорский Шар, Карские Ворота и Маточкин Шар. На востоке море ограничивается архипелагом Северная Земля. На северо-западе Карское море смыкается с Баренцевым морем, граница моря идет от м. Желания (архипелаг Новая Земля) на м. Кользат (архипелаг Земля Франца-Иосифа, восточный берег острова Грэм-Белл). На севере Карское море имеет широкий выход к Арктическому бассейну Северного Ледовитого океана, граница моря проходит от м. Кользат на м. Арктический (архипелаг Северная Земля).

Карское море одно из самых больших по площади морей в нашей стране. Его площадь равна 883 тыс. км², а средняя глубина составляет 111 м. Вдоль островов Новой Земли и острова Вайгач, на западе моря, располагается Новоземельская впадина, с глубинами 200-400 м. На северо-востоке моря наибольшие глубины наблюдаются в желобе Святой Анны (до 600 метров).

Карское море принято разделять на две части: юго-западную (площадь 335 тыс. км²) и восточную (площадь 548 тыс. км²). Граница между ними проходит по линии о. Диксон - м. Желания (рис. 1.1).

Расположенное в высоких широтах Арктики и непосредственно связанное с Северным Ледовитым океаном Карское море характеризуется полярным климатом. Относительная близость Атлантического океана немного смягчает климат, однако острова Новой Земли служат преградой на пути теплых атлантических воздушных масс. [1]

1.1. Общие сведения о гидрометеорологическом режиме Карского моря

Распределение температуры воды. Термический режим Карского моря очень не однороден. Особенности географического положения моря и атмосферной циркуляции над ним создают заметные различия в режиме температуры воздуха над разными его частями. Суровые климатические условия Карского моря не способствуют прогреву его вод. Зимой, когда море сплошь покрыто льдом, температура воды под ним близка к температуре замерзания (-1.7,-1.9°C). Высокие температуры отмечаются вблизи устьев рек, наиболее низкие в районах поступления относительно соленых вод Баренцева моря. В мелководных районах моря водные массы от поверхности до дна становятся почти однородными и имеют отрицательную температуру. Только в желобах Воронина и Святой Анны температура воды положительна и достигает 1.0-1.5°C, это обусловлено поступлением в эти районы теплых глубинных атлантических вод. Но проникновение их невелико и южных границ желобов они достигают сильно охлажденными (0°C и ниже). Термический режим поверхностного слоя в весенний период формируется главным образом в результате лучистого теплообмена и термического взаимодействия с нижними слоями воздуха. Солнечное тепло расходуется на таяние льда и нагревания воды почти не происходит. Поэтому температура воды на поверхности и подо льдом не отличается от зимней. Лишь в южных районах моря, где лед уже растаял, она постепенно повышается. В юго-восточной части моря толщина прогретой воды с температурой выше нуля достигает 10-12 м, в юго-западной части положительная температура проникает до 15-20 м, а в отдельные и до 40-50 м. Ниже температура резко падает.

В летний период распределение температуры воды на поверхности моря определяется ледовыми условиями, стоком речных вод и водообменом с соседними водоемами. Поэтому на севере в зоне дрейфующих льдов температура воды лишь немного выше точки замерзания и имеет зимнее распределение с глубиной. Открытая поверхность моря на севере прогревается до 2°C и до 6°C на юго-западе. При этом все северной и восточной частях моря прогрев распространяется на глубину 10-15 м, на юго-западе – до 60-70 м.

Температура воды выше нуля устанавливается на мелководной юго-западной части моря. На востоке температура воды от положительных значений (1.7°C) на поверхности понижается с глубиной и на горизонте 10 м достигает величины -1.2°C , а у дна -1.5°C .



Рис. 1.1. Районирование Карского моря.

В районах, находящихся под влиянием речного стока Енисея, Оби и др., температура поверхностных вод в теплые годы может достигать летом $8-10^{\circ}\text{C}$ и больше. На юго-западе моря при усилении выноса теплых баренцевоморских вод температура воды может достигать 8°C , на широте Маточкина Шара, где влияние вод из Баренцева моря ослаблено, температура воды понижается до $3-4^{\circ}\text{C}$. В северо-восточной части моря, находящейся под влиянием Арктического

бассейна, преобладают более низкие температуры воды, редко превышающие 0°C.[2]

В осенний период выхолаживание быстро уничтожает летний прогрев и выравнивает температуру по всей толще воды, исключая районы распространения глубинных атлантических вод.

В Карском море температура воды испытывает значительные сезонные колебания. Формируются они главным образом летом, за счет зависимости состояния поверхностного слоя от распределения льда, величины речного стока, притока теплых вод из других районов, колебаний положения полярного гидрофронта. Зимой колебания температуры воды в поверхностном слое незначительны, но довольно ярко проявляются в тепловом состоянии глубинных вод. В среднем величина изменчивости среднегодовой температуры воды в Карском море составляет плюс-минус 1.5°C. Наибольшая устойчивость температур наблюдается в северных районах моря, за исключением областей очищающихся от ледяного покрова. Здесь значения изменчивости особенно велики; также велики они и в районах, где важную роль играет адвекция тепла из Баренцева моря и Арктического бассейна.[3]

Распределение солености. Свободное сообщение с океаном, большой материковый сток, образование и таяние льда определяют величины и распределение солености в Карском море.

Соленость поверхностных вод Карского моря меньше средней солености океана и меняется в пределах от 3-5‰ в южной части моря до 33-34‰ на севере. Кроме того, она испытывает сезонные колебания. В холодное время года, когда речной сток мал и происходит интенсивное ледообразование, соленость характеризуется повышенными значениями. Исключая устьевые области, соленость на поверхности равна 25-30‰ и увеличивается с юга на север.

В теплые сезоны весенний приток речных вод уменьшает поверхностную соленость в приустьевых участках и в прибрежной полосе. Далее таяние льдов и максимальное распространение речных вод летом распресняют

поверхностный слой, причем складывается довольно сложное распространение величин солености. Наиболее низкая соленость (5-10‰) наблюдается в районах устья р. Оби, Енисея и других крупных рек. Севернее Обь-Енисейского мелководья соленость поверхностных вод увеличивается до 15-20‰. Такая же соленость характерна для поверхностных вод юго-западной части моря. Для северных районов Карского моря к северу и северо-востоку от м. Желания соленость поверхностных слоев характеризуется быстрым повышением с юга на север. В северных районах отмечены наиболее высокие значения солености (33.8-34.0‰).

Тем не менее, такое распределение солености изменяется таянием льдов. Среди плавающих льдов можно наблюдать соленость на поверхности на 7-8‰ ниже, чем на свободных от льда участках моря. В толще воды соленость увеличивается от поверхности ко дну. Зимой на большей части моря она относительно равномерно повышается от 30‰ на поверхности почти до 35‰ у дна. Вблизи устьев рек переход от менее соленых поверхностных вод к подстилающим их соленым водам выражен более резко. Весной, особенно в начале сезона, распределение солености по вертикали подобно зимнему. Только у берегов усилившийся сток материковых вод опресняет самый поверхностный слой моря, а с глубиной соленость резким скачком повышается до горизонта 5-7 м, ниже которого она постепенно увеличивается ко дну. Летом соленость от низких значений на поверхности (10-20‰) резко повышается с глубиной (до 29-30‰) на горизонтах 10-15 м. Отсюда она увеличивается более плавно, и у дна ее величины достигают 34 и даже 35‰.

Данный характер распределения солености по вертикали в летний период особенно ярко выражен в восточной половине моря в зоне распространения речных вод и в северных районах среди дрейфующих льдов при спокойном море. В штормовую погоду ветер перемешивает верхний 5-метровый слой воды, поэтому в нем устанавливается однородная, но несколько более высокая, чем до перемешивания, соленость. Непосредственно под перемешанным слоем ее величина резко возрастает, ниже она плавно повышается с глубиной. В

западную часть моря поступают сравнительно однородные и соленые воды Баренцева моря, поэтому здесь соленость немного выше и увеличение ее с глубиной происходит менее резким скачком, чем на востоке моря. Осенью речной сток снижается, а в море начинает образовываться лед. Вследствие этого соленость на поверхности повышается, скачек солености начинает сглаживаться, изменение ее по вертикали становится более равномерным.

Циркуляция вод. Постоянные течения. В Карском море наиболее изученными являются постоянные поверхностные течения. В их формировании большую роль играют речной сток и водообмен с прилежащими бассейнами, особенно с Баренцевым морем. Под воздействием стоковых течений и притока из других морей воды Карского моря образуют хорошо выраженный круговорот вод против часовой стрелки на юго-западе и менее отчетливый на севере (рис.5). Южный круговорот образуется западной ветвью Обь-Енисейского течения и притоком баренцевоморских вод, поступающих в море через пролив Карские Ворота и Югорский Шар. Обь-Енисейское течение при движении на север разделяется на три ветви - западную, северную и восточную; из них западная, достигая северо-восточного побережья Новой Земли, в свою очередь, разделяется на две ветви, из которых одна движется на северо-восток, а другая, под названием Новоземельского течения направляется к югу. У Карских Ворот от Новоземельского течения отделяется течение Литке, уходящее в Баренцево море, а основной поток поворачивает на восток и, сливаясь с течением из Баренцева моря, направляется к побережью Ямала, вдоль которого под названием Ямальского течения идет на север до встречи с западной ветвью Обь-Енисейского течения, замыкая тем самым круговорот поверхностных вод в юго-западной части моря. Северная струя Обь-Енисейских вод направляется на северо-восток к островам Северная Земля, а восточная – вдоль Таймырского берега к проливу Вилькицкого. У острова Русский часть этого течения поворачивает на север, следует вдоль берегов Северной Земли, а затем, несколько отклоняясь к северо-западу, замыкает северо-восточный круговорот.

Скорости постоянных течений изменяются от 5 до 15 см/с. Однако, если они совпадают по направлению с ветровыми течениями, то их скорости увеличиваются до 70-90 см/с. В зависимости от типа атмосферной циркуляции система течений может испытывать значительные изменения. Циклонические круговороты вод могут либо сокращаться, либо расширяться, а потоки вод из Баренцева моря у мыса Желания менять направление на обратное.

Уровень, приливы, приливные течения. Изменения уровня в Карском море возбуждаются приливной волной, циркуляцией атмосферы и температурным режимом вод. В годовом цикле повышения и понижения уровня проявляются как результат сезонных изменений распределения атмосферного давления над морем и соответствующих полей ветра. Их величины колеблются от 10 до 50 см. Приливные изменения уровня также не велики. Среднее значение по морю составляют 50-80 см; в районах покрытых льдом они еще меньше. Стопно-нагонные колебания уровня близки к 50 см у берегов Новой Земли и Северной Земли и повышаются до 1 м в южной прибрежной части Карского моря и еще больше в Енисейском заливе и Обской губе (до 2 м). Приливы имеют преимущественно правильный полусуточный характер. Лишь на крайнем северо-востоке отмечаются суточные приливы. В общем картина приливо-отливных явлений в Карском море довольно сложна, поскольку формируется из приливных волн, поступающих в море с разных направлений: с запада – из Баренцева моря (между Новой Землей и Землей Франца-Иосифа, а также через новоземельские проливы), с севера – из Арктического бассейна и с востока – из моря Лаптевых. Приливные волны, идущие через новоземельские и североземельские проливы, проникают в море на небольшие расстояния, их влияние ограничивается районом поступления. Основную роль играют приливные волны распространяющиеся с севера на юг вдоль восточного побережья Новой Земли и западных берегов Северной Земли. К северу от острова Уединения они сливаются воедино и эта волна, достигнув юго-западных берегов, отражается от них, и в результате интерференции здесь возникает поступательно-стоячая волна. Движение приливной волны

возбуждает приливные течения, которые во многих местах Карского моря достигают значительных величин. Например, у острова Белого и в Карских Воротах скорости приливных течений достигают 150 см/с.

Ледовые условия. Вследствие географического положения Карское море ежегодно замерзает. Лед образуется как в самом море, так и поступает из Центрального Арктического бассейна. Большую часть года Карское море покрыто сплошным ледяным покровом. В юго-западной части моря лед наблюдается в течение 7-8 месяцев, с ноября по июнь-июль. Северо-восточная часть моря в летний период не полностью очищается от льда. Льдообразование в Карском море обычно начинается в сентябре в северных районах и в октябре – ноябре на юге. В зимний период неподвижный лед бывает только вблизи берегов в виде припая. За припаем обычно располагаются плавучие льды. В большинстве случаев это обширные ледяные поля. За зиму лед достигает толщины 0.5 - 1.5 м. Таяние ледяного покрова в Карском море начинается в его юго-западной части в среднем в конце мая. В июне вытаивают молодые и однолетние тонкие льды в полыньях и в разводьях и частично однолетние средние льды. В процессе таяния ледяного покрова происходит взлом и постепенное разрушение припая и распадение его на обширные дрейфующие поля. Раньше всего припай начинает разрушаться в Амдерминском районе, где он в 80 % случаев окончательно разрушается в течение июня. В основном в середине июля взламывается припай вдоль Ямальского побережья и в Обь-Енисейском районе. К концу июля половина юго-западной части моря под влиянием тепловых и динамических процессов очищается ото льда. В конце августа - начале сентября в 80 % случаев этот район полностью освобождается ото льда. В прибрежных районах таяние льда происходит более интенсивно, чем в мористых районах. Из-за чего в июне-июле в юго-западной части моря лед в среднем располагается в центральных районах. Таяние льда и очищение от него северо-восточной части моря происходит медленнее, чем юго-западной части моря. Взлом припая в среднем начинается в начале июня со стороны его кромки. Основная площадь припая взламывается в течение июля, и к началу

августа припай сохраняются только в узкой прибрежной зоне между шхерами Минина и южной частью архипелага Норденшельда. К завершению периода таяния (в сентябре) в среднем около половины района остается занятой остаточными льдами. Наиболее интенсивно очищение моря происходит в июле и августе. В среднем к концу августа ото льда очищается около 60 % акватории моря, в основном это происходит за счет юго-западной части моря. В сентябре процессы таяния замедляются. В течение сентября вследствие дрейфа и таяния льда очищается еще 10-15 % моря. В северных районах моря в это время начинается ледообразование. В период таяния сплоченные (7-10 баллов) льды моря локализируются в ледяные массивы. В юго-западной части моря - это Новоземельский массив, в северо-восточной части - Североземельский и Северный Карский массивы. В начале летнего периода Новоземельский массив часто блокирует пролив Карские Ворота. Однако в августе в 80 % случаев он исчезает. Разделение сплоченных льдов северо-восточной части моря на два массива в большинстве лет происходит в середине августа. Северо-западные районы моря занимает Северный Карский массив, его льды разрушаются медленнее остальных ледяных массивов моря, и до 40 % его площади не вытаскиваются в летний период. Большую часть летнего периода Североземельский массив блокирует западные подходы к Североземельскому архипелагу и к проливу Вилькицкого, и в среднем до 20-25 % массива сохраняются до начала ледообразования.[4]

1.2. Ледовые условия Карского моря

Развитие ледяного покрова происходит под действием термических и динамических атмосферных и океанических процессов различных масштабов. Ледяной покров, является продуктом взаимодействия океана и атмосферы, и служит естественным индикатором интенсивности этого взаимодействия.

В работе (Зубакин Г.К., 1988) дано определение термина «состояние ледового покрова» как оптимальной совокупности его параметров, пространственно-временная изменчивость которых характеризует объект в

конкретных физико-географических условиях. В первую очередь такими крупномасштабными параметрами состояния ледового покрова Карского моря для сезонных и междугодичных (а также вековых) колебаний являются его ледовитость и положение кромки льда.[5]

1.2.1. Основные элементы сезонной изменчивости ледяных условий в Карском море

Замерзание. Устойчивое ледообразование в Карском море начинается в северной части, расположенной за 80° с.ш., в первой декаде сентября. Вначале происходит замерзание среди остаточных льдов, откуда оно распространяется в сторону чистой воды; поэтому перемещение изохрон ледообразования направлено с северо-востока на юго-запад (рис. 1.2.1).

Наиболее позднее замерзание наблюдается в области залива теплых и соленых вод из Баренцева моря. При средних условиях ледообразование всего моря длится в течение 75 суток: с 5 сентября по 18 ноября. При экстремально позднем замерзании оно начинается 20 сентября и заканчивается 24 декабря (продолжительность 95 суток), а при экстремально раннем, соответственно, 20 августа и 15 октября (продолжительность 56 суток). [6]

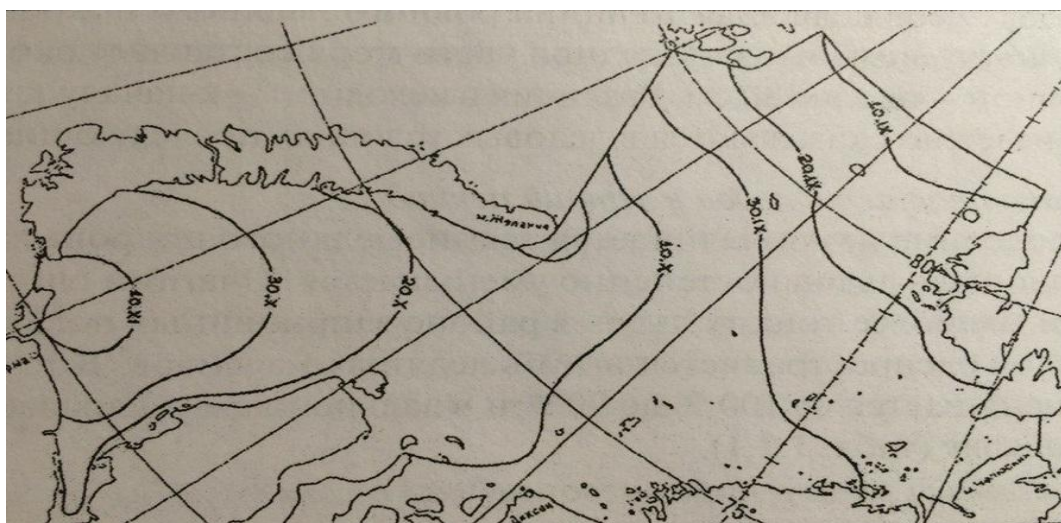


Рис. 1.2.1. Среднемноголетнее положение изохрон устойчивости ледообразования в Карском море

Нарастание толщины. Нарастание толщины льда на акватории Карского моря происходит крайне неравномерно. Во-первых, замерзание акватории начинается обычно среди остаточных льдов, откуда оно постепенно распространяется в юго-западном направлении. Во-вторых, на акватории к юго-западу от линии остров Диксон – мыс Желания, расположенной преимущественно между 66° и 75° с.ш., утепляющее влияние Северной Атлантики сказывается существенно сильнее, чем на акватории к северо-востоку от указанной границы, расположенной между 75° и 82° с.ш. В результате, интенсивность выхолаживания подстилающей поверхности сильно различается по пространству моря. Суммы среднемесячных значений температуры воздуха за зимний период на станциях Амдерма и мыс Челюскин различаются почти в два раза.

В итоге, превалирующая толщина ровного ледяного покрова осеннего образования к концу зимы в юго-западной части моря составляет около 120 см, а в северо-восточной - около 180 см. Различия в исходной – к началу таяния - толщине льдов неизбежно сказываются в ледовых условиях последующим летом.

Очищение акватории от льдов в летний период. В первой половине июня начинается таяние ледяного покрова в море, в результате чего площадь льдов постепенно уменьшается. Очагами очищения выступают участки наиболее тонких льдов в районе заприпайных полыней, откуда разрежение льдов распространяется вглубь ледяных массивов. В течение июня ледовитость уменьшается от 100 % до 90 % и в дальнейшем уменьшается в среднем на 7 % за декаду. (табл. 1.2.1).

Наиболее резкие изменения ледовых условий происходят в конце июля – первой половине августа. Эта временная граница делит летний сезон на две естественные части: в июне-июле на акватории абсолютно преобладают сплоченные льды (сплоченность 7 баллов и более), а в августе-сентябре - чистая

вода. Рубеж июля-августа совпадает с сезонным пиком площади редких и разреженных льдов (сплоченность 1—6 баллов) и соответствует периоду наибольшего разнообразия ледовых условий в Карском море. В среднем для 10 декад (конец июня - конец сентября) чистая вода занимает 44 % площади акватории, сплоченные льды - 42 %, а редкие и разреженные льды - только 14 %.

Таблица 1.2.1 – площадь льдов(%) различной сплоченности в Карском море по декадам летнего периода

Показатель	<i>VI</i> ₃	<i>VII</i> ₁	<i>VII</i> ₂	<i>VII</i> ₃	<i>VIII</i> ₁	<i>VIII</i> ₂	<i>VIII</i> ₃	<i>IX</i> ₁	<i>IX</i> ₂	<i>IX</i> ₃
Чисто	10	14	19	28	42	52	60	67	71	72
1-6 б	8	10	15	19	19	17	16	14	12	12
7-10 б	82	76	66	53	39	31	24	19	17	16
1-10 б	90	86	81	72	58	48	40	33	29	28

В летний период ледяной покров представляет собой закономерно сгруппированную совокупность льдов различной сплоченности, которую можно свести в основные навигационные градации: 0, 1-3, 4-6, 7-8, 9-10 баллов. Различными способами можно описать количественное состояние ледяного покрова. Наиболее распространенными из них являются ледовитость (площадь всех льдов сплоченностью 1-10баллов) и площадь сплоченных льдов (сплоченность 7-10баллов). Два указанных показателя связаны друг с другом, о чем свидетельствуют высокие значения коэффициента корреляции (от -0,87 до -0,93) в течение всего летнего сезона. Напротив, корреляция ледовитости/площади массива с площадью редких и разреженных льдов характеризуется, во-первых, переменным знаком связи, и, во-вторых, ее меньшей теснотой (в среднем в 2-3 раза). Таким образом, площадь сплоченных льдов и ледовитость являются двумя объективными, взаимосвязанными и равноценными по надежности и репрезентативности показателями состояния ледяного покрова в период его таяния.

Наиболее важной сезонной особенностью изменения ледовых условий в летний период является устойчивость ледяного покрова. Обычно под устойчивостью понимается сохранение в течение некоторого интервала времени основных аномалий — количественных и пространственных — исходного состояния ледяного покрова. По начальному количеству льдов и пространственным особенностям их распределения можно с определенной долей уверенности экстраполировать будущее состояние ледовых условий в море. Ведущим фактором используемым при статистическом анализе и ледовом прогнозировании, является устойчивость. Обычно в качестве количественной меры устойчивости используют инерцию — неизменность знака аномалии какого-либо ледового показателя в течение определенного промежутка времени. В сущности, инерция является нормированной устойчивостью, то есть частной разновидностью устойчивости, приведенной к среднемноголетнему значению. Впрочем, устойчивость может опираться и на такие показатели, как количественные (мода, квартили, характерные типовые значения), так и пространственные (расположение массивов, перемещение ледовых границ и т.д.), использование которых обусловлено спецификой конкретной исследовательской задачи.

Наиболее характерным инерционным показателем является коэффициент корреляции между начальной и будущей ледовитостью (площадью сплоченных льдов). По исходной площади льдов различной сплоченности можно достаточно уверенно предвидеть основные особенности ледовых условий в течение летнего сезона.

При этом с увеличением временного интервала между сравниваемыми декадами теснота связи уменьшается: для интервала в 1 месяц коэффициент корреляции составляет в среднем 0,83 для площади массива и 0,81 для ледовитости, для интервала 2 месяца - 0,66 и 0,65, для интервала 3 месяца - 0,54 и 0,55, соответственно. Важной особенностью является то, что с начала августа инерционность ледяного покрова заметно возрастает. Это связано с увеличением площади чистой воды, что создает дополнительные природные

возможности повышения устойчивости ледовых аномалий. Таким образом, с начала августа прогностические возможности чисто инерционного прогноза заметно возрастают. [5]

1.2.2. Различия ледовых условий в юго-западной и северо-восточной частях Карского моря

Как уже говорилось ранее Карское море принято разделять на юго-западную и северо-восточную части. Рассмотрим различия ледовых условий в этих частях.

Географически Карское море представляет собой единый природный объект и несмотря на это, в ледовом отношении акватория в летний период состоит из двух, практически не связанных, независимых частей, граница между которыми проходит по линии остров Диксон – мыс Желания. Ледовые условия в юго-западном и северо-восточном районе Карского моря сильно разнятся. В конце зимнего периода толщина льдов в юго-западной части акватории почти в полтора раза меньше, чем в северо-восточной. В начале летнего сезона в юго-западной части уже в июне заметно большее развитие получают заприпайные полыньи, особенно в Обь-Енисейском районе и к западу от полуострова Ямал.

В июле—августе интенсивность уменьшения площади льдов в юго-западной части Карского моря составляет 50 % в месяц и для ледовитости, и для сплоченных льдов, что примерно в 2 раза больше, чем в северо-восточной части моря (табл. 1.2.2).

В результате к концу летнего сезона ледовые условия по разные стороны от линии остров Диксон – мыс Желания существенно разнятся. Акватория в юго-западной части моря полностью очищается ото льдов к концу сентября с вероятностью 84 %; в случае наличия остаточных льдов они занимают в среднем 16 % акватории. В северо-восточной части моря полного очищения вообще не наблюдается: средняя ледовитость к концу сентября составляет 44

%, а с вероятностью 36 % льды занимают более половины акватории. Период наибольшего разнообразия ледовых условий, когда наблюдается сезонный пик площади редких и разреженных льдов, приходится в юго-западной части моря на конец июля, а в северо-восточной части моря - на конец августа.

Ледовая независимость юго-западной и северо-восточной части моря проявляется, прежде всего, в том, что между ними отсутствует количественная связь при формировании ледовых условий. Совпадение знака аномалии среднесезонной площади сплоченных льдов составляет только 52 %. Отметим, что это наименьший показатель для любых двух арктических морей, имеющих общую границу. Результатом аномальной независимости является отсутствие совпадений при формировании также и крупных аномалий (отклонения свыше $1,2\sigma$) площади сплоченных льдов, которые составляют только 19 %. В случае формирования экстремальных ледовых условий они, как правило, наблюдаются только в одной из двух частей Карского моря. В следствие этого, коэффициент корреляции между среднесезонным количеством сплоченных льдов составляет только 0,19, т.е. ниже статистически значимых величин. Прямой причиной отсутствия количественной связи между ледовыми условиями юго-западной и северо-восточной частей Карского моря является разнонаправленность влияний тепловых и динамических предикторов. Показатели связи температуры воздуха на полярных станциях, характеризующие интенсивность нарастания льдов зимой и таяния летом, обеспечивают постоянство знака ледовых аномалий в юго-западной и северо-восточной частях акватории. Потому в зимний период Карское море является единым ледовым образованием с примерно одинаковым по аномальности фоном ледовых условий по всей его протяженности. В летний же период, динамические показатели, характеризующие направление воздушных переносов и активность массообмена на характерных для данной части моря створах, показывают независимость двух частей акватории, что обеспечивает равновероятное сочетание знака ледовых аномалий.

Особенность связанности тепловых показателей заключается в том, что теснота корреляции уменьшается от зимы к лету, достигая минимума в июле, и затем вновь увеличивается к осени. Особенность динамических показателей характеризуется некоторым отличием воздушных переносов летом, что не наблюдается в других арктических морях. Это зависит только от географических причин: замкнутость Карского моря с запада и востока меридионально ориентированными архипелагами, и возникающим вследствие этого массопереносом между двумя частями единого целого.

Можно сделать предположение о том, что основной причиной противоположно направленного воздействия динамических предикторов на соседние части Карского моря является соответствие расстояния между этими частями и характерным диаметром атмосферных вихрей в Арктике, а также относительная обособленность соседних акваторий. Так как расстояние между центрами частей моря составляет около 800 км, то стационарирующий вблизи границы таксонов циклон (или антициклон) вызывает противоположные по направлению переносы по разные стороны от естественной границы. Как следствие, исходный – для обеих акваторий – фон толщины льдов перебивается более сильным воздействием, и отсутствие совпадения ледовых аномалий становится доминирующим фактором.

Таким образом, разделение географически единого Карского моря на две естественные ледовые части можно свести к нескольким характерным причинам:

1. Географические факторы:

- обособленный от остальной части моря естественный залив между островом Новая Земля и полуостровом Ямал,
- наличие автономных глубоководных образований – Новоземельская впадина, желоба Воронина и Святой Анны,
- присутствие/отсутствие мелких и средних островов.

2. Климатические факторы:

Таблица 1.2.2 – площадь редких и разреженных льдов (1-6 баллов), сплоченных льдов (1-10 баллов), в юго-западной и северо-восточной частях Карского моря по декадам летнего сезона

Акватория	VI_3	VII_1	VII_2	VII_3	$VIII_1$	$VIII_2$	$VIII_3$	IX_1	IX_2	IX_3
Площадь редких и разреженных льдов, %										
ЮЗ	12	15	21	27	21	13	8	3	2	2
СВ	5	7	11	14	18	20	21	20	19	18
СВ-ЮЗ	-7	-8	-10	-13	-3	7	13	17	17	16
Площадь сплоченных льдов, %										
ЮЗ	74	63	48	28	13	6	3	2	1	0,4
СВ	87	84	77	69	55	46	37	30	27	25
СВ-ЮЗ	13	21	29	41	42	40	34	28	26	25
Ледовитость, %										
ЮЗ	86	78	69	55	34	19	11	5	3	3
СВ	92	91	88	83	73	66	58	50	46	43
СВ-ЮЗ	6	13	19	28	39	47	47	45	43	40

- меньшее/большее влияние утепляющей Атлантики или охлаждающей Арктики.

- различия: в сроках начала ледообразования (вторая половина октября и вторая половина сентября), средней интенсивности нарастания льда зимой (5— 6 см и 7 8 см за декаду), продолжительности нарастания льдов (18-20 и 24-26 декад).в то пни не ровных льдов к началу таяния (120-140 см и 180-200 см), в сроках начала таяния льдов (вторая половина мая и середина июня).

3. Гидрологические факторы:

- колоссальная водная система Оби-Енисея является естественной границей между двумя таксонами, причем само речное взморье,

несомненно, тяготеет к юго-западной части моря.

4. Ледовые факторы:

- разделение и независимое существование Новоземельского и Североземельского массивов,
- режим полыней,
- площадь и значимость припая,
- общая граница с Арктическим бассейном.

Очевидно, что среди указанных причин разделения Карского моря на юго-западную и северо-восточную ледовые части географические, климатические и гидрометеорологические причины образуют некое единое целое, внутри которого четко и однозначно разделить составляющие трудно, если вообще возможно. Необходимо сказать, что географические причины образуют некоторую базу, на основе или под влиянием которой проявляются все остальные природные факторы.

Таким образом, в летний период Карское море состоит из двух самостоятельных частей с сильно различающимися природными свойствами. Из-за этого ранее предлагался иной вариант районирования, а именно: юго-западную часть акватории назвать собственно Карским морем, а северо-восточную часть акватории – Западно-Сибирским морем (в качестве терминологической параллели к уже существующему Восточно-Сибирскому морю). [7]

1.2.3. Пространственные особенности очищения акватории Карского моря

Рассматривая пространственные особенности очищения акватории Карского моря ото льда, выявляется независимость количественных показателей состояния ледяного покрова в юго-западной и северо-восточной части моря, которая сопровождается соответствующими особенностями пространственного очищения акватории, которые в обеих частях моря отличаются характерным своеобразием и непохожестью.

Существует два пространственных варианта очищения акватории в юго-западной части Карского моря, которые наблюдаются с соответствующей локализацией у Новоземельского массива.

1. При западном положении массива (повторяемость сценария 60 %) Новоземельская полынья отсутствует, сплоченные льды непосредственно примыкают к побережью Новой Земли, Ямальская полынья получает наибольшее развитие, а очищение акватории распространяется с востока на запад. В этом случае остатки массива в августе-сентябре расположены у восточного берега Новой Земли.

2. При мористом положении массива (повторяемость сценария 40 %) сплоченные льды сдвинуты к Ямалу, Новоземельская и Ямальская полыньи получают одинаковое или сопоставимое развитие, а очищение моря происходит с востока и запада к центру акватории. В этом случае остатки массива в августе расположены у линии остров Диксон – мыс Желания на границе с северо-восточной частью акватории.

При западном и мористом положении площадь Новоземельского массива примерно одинакова при среднесезонном осреднении, но при этом наблюдается различная интенсивность уменьшения количества сплоченных льдов летом. Разрушение Новоземельского массива при его мористом расположении происходит заметно активнее, чем при западном, особенно в период наибольших изменений в середине июля – начале августа. В случае западного положения массива ледовитость моря на 10-15 % меньше, чем при мористом положении, за счет меньшего развития периферии (льдов 1-6 баллов).

В северо-восточной части Карского моря так же наблюдаются два пространственных варианта очищения акватории в зависимости от взаимного расположения Североземельского и Северного Карского массивов.

1. При широтном сценарии (повторяемость 44 %) массивы в июне разделяются, между ними формируется сплошная полоса чистой воды, редких или разреженных льдов. Разделение массивов происходит на границе припайных и дрейфующих льдов по линии остров Средний — остров

Кирова - остров Исаченко – остров Свердруп. В таком случае Североземельский и Северный Карский массивы существуют автономно.

2. При меридиональном сценарии (повторяемость 56 %) массивы в течение летнего сезона соединены, между ними отсутствует сплошная переходная зона льдов пониженной сплоченности и чистой воды. В этом случае сплоченные льды формируют единое ледовое образование.

Взаимное расположение массивов, сформировавшееся в июне, определяет последовательность и особенности очищения акватории в течение всего летнего сезона. При меридиональной конфигурации очищение распространяется с запада на восток: от юго-западной части Карского моря и от Баренцева моря по направлению к Северной Земле; при широтной – от Центральной Карской полыньи на север, к границе с Арктическим бассейном и на юг, к полуострову Таймыр. При соединенных массивах, количество сплоченных льдов в море намного больше, чем при разъединенных – в среднем за сезон на 20 %.

Так же с пространственными особенностями, свойственными отдельно юго-западной и северо-восточной частям моря, наблюдаются общие пространственные закономерности, характерные для всей акватории.

Важным элементом ледового режима Карского моря является двуmodalность взаимного расположения Новоземельского и Североземельского массивов.

При первом сценарии (повторяемость 57 %) массивы разделяются по линии остров Диксон — мыс Желания и автономно существуют в юго-западной и северо-восточной части моря. Наиболее вероятный период разделения — третья декада июля.

При втором сценарии (повторяемость 43 %) массивы остаются соединенными и существуют как единое образование. При этом Новоземельский массив представляет собой естественный отрог сплоченных льдов северо-восточной части Карского моря, постоянно сокращающийся по мере таяния льдов.

Интересно отметить, что площадь Новоземельского массива в случае его отделения от Североземельского массива по сравнению с вариантом их совместного расположения больше примерно на 0,4-0,5 значения среднеквадратического отклонения. При соединенном состоянии Новоземельского и Североземельского массивов корпус сплоченных льдов в Карском море в целом смещен в северо-восточном направлении, а при разъединенном наблюдается некоторый естественный ледовый баланс между двумя частями моря. Этот факт отражает независимое формирование ледовых условий в крупных ледово-географических районах моря и подтверждает необходимость его деления на юго-западный и северо-восточный фрагменты.

Определенная согласованность имеется в режиме пространственного положения Новоземельского массива с особенностями его отделения от Североземельского массива. Наиболее вероятно отделение Новоземельского массива от сплоченных льдов северо-восточной части моря при его западном положении (повторяемость 80 %), при мористом – соединении (повторяемость 76 %). С другой стороны, если массивы соединены, то в 73 % случаев Новоземельский массив занимает западное положение, а если разъединены, то в 83 % мористое. Как следствие, в 78 % случаев реализуются лишь два варианта из возможных природных сочетаний:

1. Разделение сплоченных льдов юго-западной и северо-восточной частей Карского моря при западном положении Новоземельского массива.
2. Соединение сплоченных льдов юго-западной и северо-восточной частей Карского моря при мористом положении Новоземельского массива.

Каждое из остальных сочетаний (соединенные / западный и разъединенные / мористый) повторяется в среднем только 1 раз в 10 лет. Таким образом, реализуются две устойчивые комбинации, характеризующие пространственные особенности очищения всей акватории Карского моря.

Многолетнее изменение ледовитости так же по-разному проявляется в обоих районах моря. Решающее влияние на формирование ледовых аномалий в юго-западном районе акватории оказывает температурный режим в

течении зимнего периода нарастания толщины ледяного покрова (октябрь-апрель), который в основном определяется вариациями формы атмосферной циркуляции по типу *E*. В следствии, многолетняя изменчивость характеризуется доминированием относительно долгопериодных колебаний. Решающее влияние на формирование ледовых аномалий в северо-восточном районе акватории оказывает температурный режим в течении летнего периода таяния льдов (прежде всего, июнь), который в основном определяется атмосферными циркуляциями по типу *W*. В следствии многолетняя изменчивость характеризуется доминированием относительно короткопериодных колебаний. [8]

Глава 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА.

2.1 Исходные данные

В качестве исходных данных для исследования, из глобального интернет архива NOAA NCEP EMC SMB GLOBAL Reyn_SmithOIv2 monthly были взяты среднемесячные значения сплоченности льда в узлах постоянной сетки с шагом в 1° . Ежемесячные поля NOAA NCEP были получены путём линейной интерполяции. Ледяные поля показывают приблизительные среднемесячные значения концентрации льда. Концентрация льда показывает процент площади покрытой льдом в узлах сетки. Данные были получены за период с января 1982 – по январь 2015 года. Данные были выбраны как по всей акватории моря, так и отдельно для его юго-западной и северо-восточной частей, в связи с различным ледовым режимом. Всего по морю получилось 175 точек с шагом в 1° . В юго-западной части 106 точек и 74 в северо-западной. Для дальнейшей работы данные по всем точкам были осреднены и построены временные ряды среднемесячных и среднегодовых значений по всей акватории моря, а так же по юго-западной и северо-восточной частям. Так же были сформированы дополнительные исходные временные ряды $t_i = i$ и t_i^2 , где $i = 1, 2, 3 \dots N$, где N – длина исходной реализации. [9]

Для анализа первичных статистических параметров были составлены климатические ряды среднемесячных значений сплоченности льда, по каждому месяцу за весь период с 1982 по 2015 года.

2.2 Методы анализа исходных данных

Для исследования особенностей временной изменчивости ледовитости Карского моря в работе были использованы следующие методы анализа временных рядов: корреляционный анализ, анализ временного тренда и

гармонический анализ, рассмотренные далее более подробно.

2.2.1 Первичные статистики

Для характеристики различных статистических рядов, в том числе и временных используются показатели первичной статистики. Такие показатели подразделяются на несколько групп описанных в [10]:

- 1) показатели положения (среднее арифметическое, мода, медиана);
- 2) показатели рассеяния (дисперсия, размах, стандартное отклонение и др.);
- 3) эмпирическая функция распределения (ЭФР) и характеристики ее формы.

Рассмотрим подробнее эти группы. К показателям положения относится *среднее арифметическое* значение статистического ряда (\bar{x}), которое характеризует центр тяжести исследуемой характеристики (в данной работе сплоченности ледяного покрова) или точку ее равновесия при различных колебаниях. Среднее арифметическое рассчитывается по формуле :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2.1)$$

где N – длина исходного ряда

Медиана (Me) показывает значение признака, который приходится на середину ранжированного (упорядоченного по возрастанию) ряда. Главное свойство медианы состоит в том, что сумма абсолютных отклонений членов ряда от медианы это величина наименьшая:

$$\sum_{i=1}^N |x_i - Me| = \min. \quad (2.2)$$

Мода (Mo) – это наиболее часто встречаемая в статистическом ряду величина.

К показателям разброса относится *дисперсия* (D) и связанное с ней *стандартное отклонение* (или среднее квадратическое) (σ), которые характеризуют среднее рассеяние значений ряда от среднего арифметического значения и рассчитываются по формулам :

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad ; \quad \sigma = \sqrt{D}. \quad (2.3)$$

Так же к показателям разброса относится *размах вариаций* (R) , который характеризует максимальный разброс значений

$$R = \max - \min . \quad (2.4)$$

Рассмотрим характеристики формы ЭФР:

Асимметрия показывает, насколько ЭФР симметрична относительно среднего значения. Асимметрия рассчитывается по формуле:

$$As = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3 \quad (2.5)$$

Экцесс характеризует островершинность распределения и рассчитывается по формуле:

$$Ex = \left[\frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4 \right] - 3. \quad (2.6)$$

2.2.2 Корреляционный анализ

Коэффициент корреляции R представляет собой степень тесноты линейной зависимости двух случайных величин, при возрастании одной из

которых, другая имеет тенденцию возрастать (убывать) по линейному закону. Рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2i} - \bar{x}_2)]}{N\sigma_1\sigma_2} \quad (2.7)$$

При $|R|=1$ статистическая связь максимальна, а при $|R|=0$ связь отсутствует. Для промежуточных значений R , чтобы определить отсутствие или значительную величину связи, надо сделать проверку коэффициента корреляции на значимость. Для проверки значимости выбирается критерий Стьюдента, который рассчитывается по формулам:

$$t^* = \frac{R}{\sigma_R}, \text{ где } \sigma_R = \frac{1-R^2}{\sqrt{N-1}}, \quad (2.8)$$

где σ_R - стандартное отклонение для распределения коэффициентов корреляции генеральной совокупности.

Рассчитывается критическое значение $t_{кр}$. Коэффициент корреляции считается значимым если t - критерий Стьюдента превышает критическое значение при определенных уровне значимости (5%) и числе степеней свободы ($\nu=N-1$). N - длина ряда.

2.2.3 Выделение и анализ трендовой компоненты

В ходе сбора данных мы получили некую величину X (сплоченность льда, в %) измеренную в m точках пространства, при этом длина каждой реализации составляет n , в результате чего, мы получаем матрицу размером $m \times n$. Использование методов многомерного статистического анализа применительно к этой матрице является основной задачей исследования пространственно-временной изменчивости.

Для применения большинства методов статистического анализа временных рядов одним из главных требований к рядам является их стационарность. Стационарностью ряда называют неизменность его основных статистических характеристик во времени. Стационарные случайные процессы описывают процессы, которые протекают во времени почти однородно. В частности, это относится к среднему значению ряда и его дисперсии. Итак на первом этапе анализа временного ряда оценивают его стационарность, в случае, если ряд является нестационарным, его преобразовывают к стационарному виду.

В случае нестационарности ряда среднее значение и/или дисперсия могут меняться скачкообразно для разных частей выборки, или же могут иметь непрерывных характер изменения. В случае непрерывного характера изменения говорят, что ряд имеет тренд (по математическому ожиданию или по дисперсии).

Так же в генеральной совокупности (ГС) может существовать некоторое колебание, и, выбирая из ГС выборку, мы можем это колебание не захватить всей длиной выборки (рис. 2.1). Тогда оно отразится в нашей выборке как тренд.

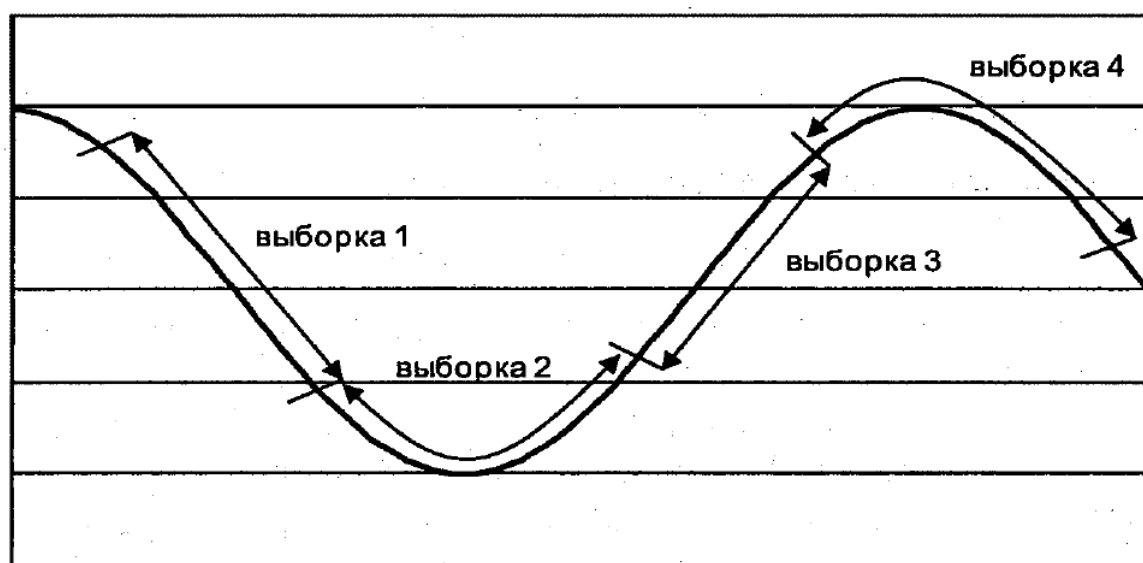


Рисунок 2.1 – Генеральная совокупность и выборки из нее

Тренд отражает наличие во временной изменчивости некой исследуемой характеристики длиннопериодного колебания, период которого существенно превышает длину выборки.

Можно сделать вывод, что тренд может быть линейным (рис.2.1 выборки 1,3) или квадратичным (рис.2.1, выборки 2,4). Это зависит от того, на какую часть длиннопериодного колебания попала выборка.

Уравнение линейного тренда:

$$y = a_1 t + a_0 + \varepsilon, \quad (2.9)$$

Уравнение не линейного (квадратичного) тренда:

$$y = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 + \varepsilon, \quad (2.10)$$

где t – время;

ε – отклонение от прямой.

К основным характеристикам тренда относятся :

1. Коэффициент детерминации r^2 (для линейного тренда) или же его нелинейный аналог η^2 , которые характеризуют вклад тренда в общую дисперсию ряда. Вклад может быть как значимым, так и не значимым. Что бы определить это , делается проверка на значимость коэффициента корреляции гили η .

Если коэффициент является не значимым , считается, что тренда нет.

2. Величина тренда – это изменение характеристики по линейному тренду за определенный промежуток времени. Как правило , для среднегодовых значений величина тренда рассчитывается за 10 лет, для среднемесячных за 1 год.

При оценке тренда наиболее важным является проверка тренда на значимость, т.е. проверяется на сколько существенен его вклад в изменчивость случайного процесса. Для проверки на значимость используется критерий

Стьюдента. При оценке значимости линейного тренда записывается нулевая гипотеза по отношению к коэффициенту регрессии a_1 и коэффициенту корреляции r :

$$H_0: |a_1| = 0, \quad H_0: |r| = 0 \quad (2.11)$$

Для проверки данных гипотез рассчитывается выборочный критерий Стьюдента, причем можно показать, что $t_r = t_{a_1}$. Это облегчит оценку значимости тренда. Для проверки гипотезы используется критерий Стьюдента в виде:

$$t = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}. \quad (2.12)$$

Затем осуществляется проверка неравенства :

$$t > t_{кр}(\alpha, v = n - 2). \quad (2.13)$$

Тренд считается значимым, если его оценки больше его критического значения, при заданном уровне значимости.

В случае нелинейного тренда рассчитывается корреляционное значение η и проверяется нулевая гипотеза, как и коэффициента корреляции. По величине корреляционного отношения и коэффициента корреляции можно легко определить коэффициент детерминации, который показывает вклад тренда в описание дисперсии функции отклика.

Величина линейного тренда Tr , определяется по формуле

$$Tr = \frac{(a_0 + a_1 t_n) - (a_0 + a_1 t_1)}{n} = \frac{a_1(n-1)}{n} \approx a_1, \quad (2.14)$$

где n – длина ряда.

Из формулы (2.14) видно, что величина линейного тренда определяется коэффициентом регрессии. Таким же образом для нелинейного тренда вычисляются его первое и последнее значения по формуле (2.10), а затем разность делится на длину интервала. В итоге получаем длину тренда в единицу времени. Нужно иметь в виду, что рассчитанный таким образом для нелинейного тренда коэффициент детерминации выше в сравнении с линейным трендом. При этом чем больше «крутизна» тренда, тем и различия между линейным и нелинейным трендами больше.

Стоит отметить, что приведенные выше формулы (2.9) – (2.10) описывают тренд по среднему арифметическому. Этот вид трендов наиболее часто встречается в природных процессах.

Если в исследуемой выборке и линейный и нелинейный тренды получаются значимыми, в таком случае при анализе отдают предпочтение нелинейному тренду, если он вносит значительно больший вклад (более чем на 5%) в дисперсию выборки, если же разница вкладов менее 5%, предпочтение отдают линейному тренду.

Для последующего статистического анализа тренд удаляется из временного ряда, т.е. из исходного ряда вычитаются значения рассчитанные по тренду :

$$dy_i = y_i - (a_1 t_i + a_0) \text{ или } dy_i = y_i - (a_2 t_i^2 + a_1 t_i + a_0). \quad (2.15)$$

2.2.4 Гармонический анализ

Для описания периодических и квазипериодических процессов, может быть использован гармонический анализ, который представляет собой разложение в ряд Фурье. Важно также, что разложение в ряд Фурье носит более универсальный характер. Оно позволяет описать любую реализацию случайной функции с помощью конечного числа гармоник.

Внутренней структуре временного ряда могут отмечаться одна или несколько циклических составляющих. Наиболее ярко выраженные из них отражаются в автокорреляционной функции (АКФ). Менее выраженные могут не проявиться в АКФ. Однако если задача состоит в выявлении в исследуемом процессе только циклических составляющих, тогда можно воспользоваться спектральным или гармоническим анализом, не рассчитывая предварительно АКФ.

Итак, если мы имеем функцию $f(t)$, то в интервале $[T, T+2\pi]$ её можно представить в виде ряда Фурье:

$$f(t) = \bar{f} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (2.16)$$

где \bar{f} – математическое ожидание функции $f(t)$;

ω – частота;

a_n и b_n коэффициенты, определяемые как

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt. \quad (2.17)$$

Разложение в ряд Фурье не только точно представляет функцию $f(t)$ при длине ряда $N \rightarrow \infty$, но так же при фиксированной величине N обеспечивает наименьшую среднюю квадратическую ошибку по сравнению с любым другим представлением функции $f(t)$ в виде тригонометрического ряда по $\cos(n\omega t)$ и $\sin(n\omega t)$ той же длины N .

Слагаемые ряда Фурье

$$U_n = a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.18)$$

называются гармониками. Если ввести угол φ_n так, что

$$\cos\varphi_n = \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}, \quad \sin\varphi_n = \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}, \quad (2.19)$$

то гармоники будут иметь вид

$$U_n = A_n \cos(n\omega t - \varphi_n), A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}. \quad (2.20)$$

Величины A_n и φ_n называются амплитудой и фазой гармоники. Фаза гармоники представляет собой временной интервал наступления первого максимума от начала отсчета. Амплитуда гармоники показывает наибольшее отклонение характеристики от среднего значения на данном периоде.

В результате разложения в ряд Фурье мы имеем постоянную компоненту \bar{f} и сумму гармоник с частотами, кратными основной частоте ω , постоянными амплитудами A_n и начальными фазами φ_n .

Так как гармоники некоррелированы друг с другом, то дисперсия суммы всех гармоник равна сумме дисперсий этих гармоник. Следовательно можно оценить вклад любой гармоники в общую дисперсию процесса, который равен

$$k_i = \frac{A_i^2}{2\sigma^2}, \quad (2.21)$$

где σ – стандартное отклонение;

A_i – амплитуда i -й гармоники.

Важной частью в описании гармоник является отделение значимых гармоник от незначимых. Для этой цели используется дисперсионный анализ. Вклад гармоник k_i можно представить как коэффициент детерминации, т.е. ту часть дисперсии процесса, которая описывается данной гармоникой. При извлечении корня из k_i , получаем коэффициент корреляции между данной гармоникой и исходным процессом, т.е.

$$r = \sqrt{k_i}. \quad (2.22)$$

Значимость величины r , как и в трендовом анализе, оценивается по критерию Стьюдента. После определения значимых гармоник, вычитаем их суммарную дисперсию из дисперсии ряда и находим дисперсию остатков:

$$D_{\varepsilon} = D_x - \sum_{i=1}^p k_i, \quad (2.23)$$

где p – число значимых гармоник.

Общую схему гармонического анализа можно разбить на следующие этапы:

- 1) определение средние арифметической величины;
- 2) оценка коэффициентов Фурье a_i и b_i и построение функции аппроксимации исходных данных;
- 3) оценка вклада отдельных гармоник в общую дисперсию ряда;
- 4) интерпретация значимых гармоник;
- 5) исключение значимых гармоник из исходного ряда с целью дальнейшего анализа остатков.

Современные статистические программы («Statistica», «SPSS» и т.п.) рассчитывают разложение Фурье методом БПФ (быстрого преобразования Фурье) при этом теряют информацию о некоторых характеристиках гармонических составляющих. В качестве результата в таких программах представляется зависимость дисперсии гармонических составляющих от их частоты, и называется такая зависимость периодограммой (или спектром). В периодограммах гармоники, имеющие большую дисперсию (и соответственно, амплитуду), представлены «пиками» на соответствующем графике спектра.

Для большинства исследований представляется достаточным выявление частот (и соответственно, периодов) для которых отмечаются пики периодограммы. Однако, часто возникает необходимость восстановить исходный процесс по нескольким значимым гармоникам, тогда необходимо прибегнуть к процедуре гармонического анализа на основе

рассчитанной периодограммы. По таблицам и графикам периодограмм , полученным методом БПФ , определяются периоды пиков спектра , и далее для этих периодов проводится гармонический анализ. Рассчитываются характеристики гармоник, формулируются уравнения для них, рассчитываются ряды этих гармоник (в зависимости от времени) и путем сложения этих рядов получается восстановленный ряд. В данной работе метод БПФ использовался для ряда среднегодовых отклонений. Ряд отклонений получается путем удаления из исходного ряда тренда (если он значим) и среднего значения (если тренд не значим). [11]

Глава 3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВИТОСТИ КАРСКОГО МОРЯ

3.1 Климатическая изменчивость состояния ледяного покрова Карского моря

Как уже говорилось во 2-ой главе, для количественных оценок состояния ледяного покрова использовался целый набор статистических параметров, которые характеризуют пространственные и временные интервалы изменчивости: среднее значение, дисперсия, тренды, среднеквадратическое отклонение и др. В данной работе проведен анализ с использованием вышеперечисленных статистических методов.

В работе использовались данные по сплоченности льда в Карском море в период с 1982 по 2015 гг. Анализ имеющихся данных позволяет выявить некоторые особенности ледового режима Карского моря, проследить его сезонную и многолетнюю изменчивость.

В данной части исследования приведены основные статистические параметры значений ледовитости Карского моря. Среднемесячные и среднегодовые значения ледовитости позволяют построить среднегодовой ход этой характеристики. В таблице 3.1.1 приведены основные статистические параметры ледовитости по всей акватории Карского моря, вычисленные по имеющимся значениям.

По среднемноголетним данным видно, что максимум ледовитости приходится на январь – март, минимум на сентябрь. Так же из полученных данных видно, что ледообразование Карского моря начинается в сентябре – октябре, начало таяния приходится на май – июнь. Максимальное значение ледовитости (99,3 %) было отмечено в январе 2003 г. и феврале 1998 г. А минимальное (0 %) в сентябре 1995 г. Особо следует выделить 1989 год, когда были зафиксированы максимальные для августа и сентября значения ледовитости и максимальное значение в феврале. Так же уникальным можно считать 1995 год, в котором были отмечены наименьшие показатели

ледовитости в апреле, мае, июле, августе и сентябре.

Таблица 3.1.1 - Статистические параметры среднемесячных значений ледовитости Карского моря

параметры ледовитости	месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
среднее значение	95,3	95,4	95,3	93,9	89	74,1	38,4	12,3	6,2	29,9	73,4	88,4	66
максимальное значение, годы	99,3	99,3	98,4	98,6	94,9	88,6	68,1	34,2	23,8	72,2	96,5	97,8	80,9
	2003	1998	2004	2004	1984	1983	1999	1989	1989	1998	1998	2002	
минимальное значение, годы	88,5	82,2	91,8	72	75,9	50,7	10,5	0,2	0	5,1	36,2	61,6	47,9
	2009	2012	2006	1995	1995	2015	1995	1995	1995	1985	2012	2012	
дисперсия	9,9	12,6	4,9	23,2	23,2	115	199	75,9	40,6	289	152	66,8	84,2
среднеквадратическое отклонение	3,1	3,6	2,2	4,8	4,8	10,7	14,1	8,7	6,4	16,9	12,3	8,2	8
коэффициент асимметрии	-0,8	-2,0	-0,2	-2,9	-1,2	-0,8	-0,2	1,0	1,3	0,4	-0,6	-1,5	-0,6
коэффициент эксцесса	-0,4	5,1	-1,3	12,5	0,9	-0,1	-0,4	0,7	1,1	-0,3	1,1	2,4	1,8

На рисунке 3.1.1 представлен сезонный ход сплоченности льда на всей акватории Карского моря, построенный по данным из таблице 3.1.1. Помимо среднемноголетних значений сплоченности льда, на рисунке 3.1.1 представлены значения дисперсии данной величины.

Наименьшие значения дисперсии наблюдаются в зимний период, что говорит о том, что этот период можно считать наиболее «предсказуемым», так как для него характерен наименьший разброс значений относительно среднего. Так же если учесть, что на январь – март приходятся наибольшие среднемесячные значения сплоченности льда, то можно сказать, что этот период характеризуется «стабильно высоким» значением рассматриваемой величины. Наибольшее же значение дисперсии приходится на сентябрь, это говорит о том, что в этом месяце наиболее сильный разброс данных, и сложнее предсказать, насколько сильно очистится акватория моря ото льда.

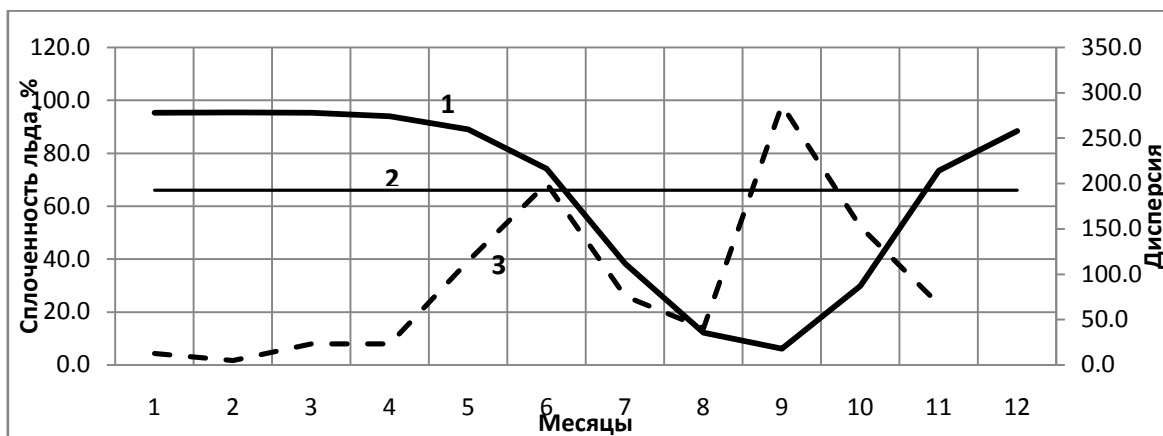


Рисунок 3.1.1 - сезонный ход (1), среднее многолетнее значение (2), и среднемесячные значения дисперсии (3) сплоченности льдов Карского моря (по данным таблицы

Как уже неоднократно говорилось, Карское море в своей юго-западной и северо-восточной частях имеет несколько разных ледовый режим, поэтому далее рассмотрим каждую из этих частей по отдельности.

В таблицах 3.1.3 – 3.1.4 представлены статистические параметры многолетних среднемесячных значений ледовитости в северо-восточной и юго-западной частях соответственно.

Таблица 3.1.3 – статистическиепараметры среднемесячных значений ледовитости в северо-восточной части Карского моря, %

Параметры ледовитости	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Среднее значение	97,3	97,3	97,0	95,7	91,8	78,1	52,1	24,0	13,2	47,2	91,4	95,8	73,4
Максимальное значение, годы	100	99,9	99,8	99,4	99,0	94,7	88,9	79,8	56,0	89,0	98,2	99,9	92,0
	2003	2003	2003	2003	1984	1989	2003	1989	1989	1998	1992	2000	
Минимальное значение, годы	93,1	92,4	92,3	88,6	79,1	54,0	17,6	0,3	0	7,1	52,6	81,7	54,9
	2013	2005	2014	1995	1997	1984	1995	1995	1995	2012	2012	2002	
Дисперсия	4,3	3,6	3,3	7,0	16,1	145	379	362	213	662	66	12,1	156
Среднеквадратическое отклонение	2,1	1,9	1,8	2,6	4,0	12,0	19,5	19,0	14,6	25,7	8,1	3,5	9,6
Коэффициент асимметрии	-0,7	-1,0	-1,1	-0,7	-0,8	-0,5	0	1,3	1,4	-0,1	-3,5	-2,2	-0,7
Коэффициент эксцесса	-0,6	0,4	0,7	0	1,7	-0,9	-0,9	1,8	1,5	-1,3	15,8	7,3	2,1

Из полученных данных видно, что в юго-западной части моря акватория практически полностью очищается ото льда в сентябре, в северо-восточной же части полного очищения не наблюдается, за исключением 1995 года, когда наблюдался минимум ледовитости в этой части моря. В зимний период в северо-восточной части наблюдается почти 100% сплоченность льдов, таяние начинается с апреля. Стоит отметить 1989 год, когда в северо-восточной части в сентябре акватория очистилась лишь на 44%, тогда как среднее значение за весь период значение составляет 87%. В юго-восточной части в этот год, так же наблюдается максимальное значение ледовитости за весь период в сентябре.

Таблица 3.1.4 – статистические параметры среднемесячных значений ледовитости в юго-западной части Карского моря, %

Параметры ледовитости	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Среднее значение	93,9	94,2	94,3	92,8	87,1	71,2	28,5	3,7	1,0	17,9	61,4	83,4	60,8
Максимальное значение, годы	98,9	99,4	98,4	99	95,7	90,7	64,2	23,7	4,6	61	97	96,4	77,4
	2003	1998	2002	2004	1999	1987	1999	1999	1998	1998	1998	2002	
Минимальное значение, годы	84,9	75,3	89	61,1	67,8	41,5	5,0	0	0	2,8	24,3	46,4	41,5
	2009	2012	2011	1995	1995	1995	1995	2011	1995	2007	2012	2012	
Дисперсия	17	24,6	8,4	43,9	46,1	159	207	21,4	1,6	163	285	143	93,3
Среднеквадратическое отклонение	4,1	5	2,9	6,6	6,8	12,6	14,4	4,6	1,3	12,8	16,9	11,9	8,3
Коэффициент асимметрии	-0,8	-2,2	-0,3	-3,5	-1,4	-1	0,4	3	1,4	1,5	0	-1,4	-0,4
Коэффициент эксцесса	-0,5	5,9	-1,1	16	1,6	0,7	-0,2	10,8	1,1	2,7	-0,4	1,7	3,2

По данным таблиц 3.1.3 и 3.1.4 были построены графики сезонного хода, на которых так же показано среднее многолетнее значение и среднемесячные значения дисперсии.

По графикам отображённым на рисунках 3.1.2 – 3.1.3 видно, кривые ледовитости в разных частях моря имеют похожий характер, однако, юго-западная часть моря сильнее очищается ото льда. Так же анализирую кривые

дисперсии, видно, что для северо-восточной части с января по апрель наблюдается наиболее «предсказуемый» период, то есть в эти месяцы ледовитость стабильно высока. Наиболее не предсказуемым месяцем является октябрь. В юго-восточной части Карского моря можно отметить в принципе лучшую предсказуемость процессов, так как значения дисперсии, гораздо ниже. Так же стоит отметить что в этой части моря в сентябре наблюдается «стабильно низкая» ледовитость, заметим, что в данных по всему Карскому морю было выявлено, что сентябрь является самым трудно «предсказуемым» месяцем.

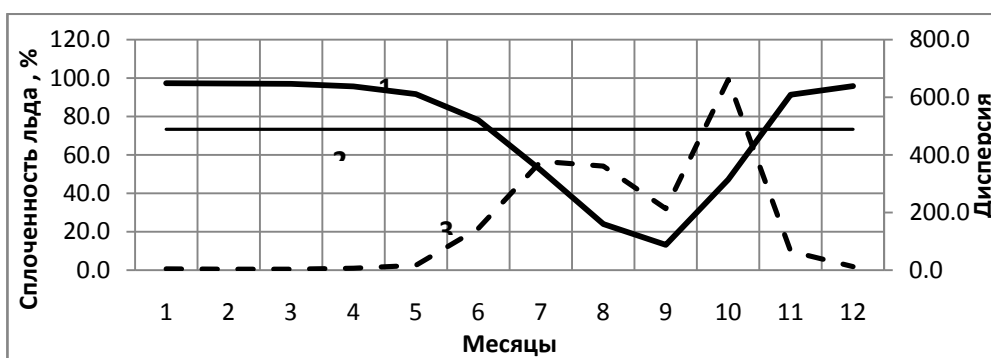


Рисунок 3.1.2 - Сезонных ход (1), среднее многолетнее значение (2) и среднемесячные значения дисперсии (3) сплоченности льда в северо-восточной части Карского моря (по данным таблицы 3.1.3)

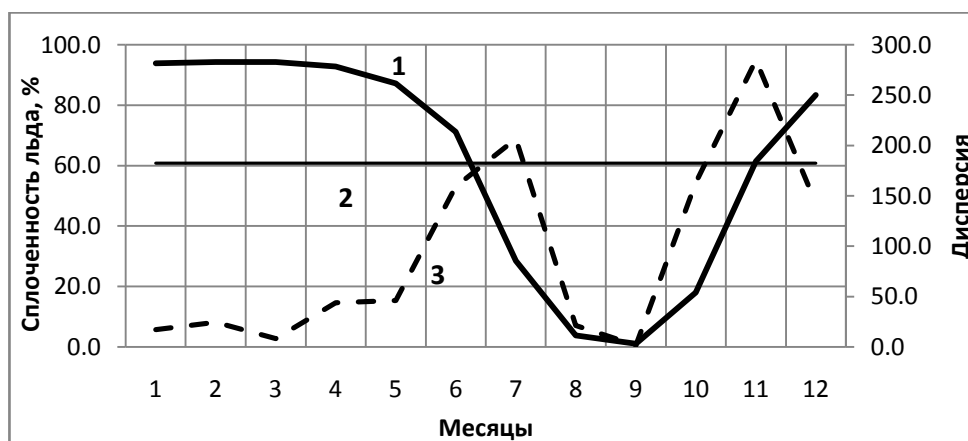


Рисунок 3.1.3 - Сезонных ход (1), среднее многолетнее значение (2) и среднемесячные значения дисперсии (3) сплоченности льда в юго-западной части Карского моря (по данным таблицы 3.1.4)

Из полученных данных можно сделать вывод, что несмотря на то, что Карское море представляет собой единый географический объект, в ледовом отношении в летний период акватория состоит из двух разных частей. Однако в зимний период Карское море является единым ледовым образованием с почти равномерным процентом ледовитости на всей его территории.

3.2 Выделение и анализ трендовой компоненты в ледовитости Карского моря

Для исследования изменчивости ледовитости Карского моря использовался анализ временного тренда, основными характеристиками которого принята величина тренда и коэффициент детерминации R^2 . Расчёты проводились как для всей акватории Карского моря, так и в отдельности для его юго-западной и северо-восточной частей.

Приведённые ниже рисунки 3.2.1 -3.2.6, показывают какая тенденция изменения ледовитости происходила за многолетний период. Данные графики составлены по среднемесячным значениям ледовитости.

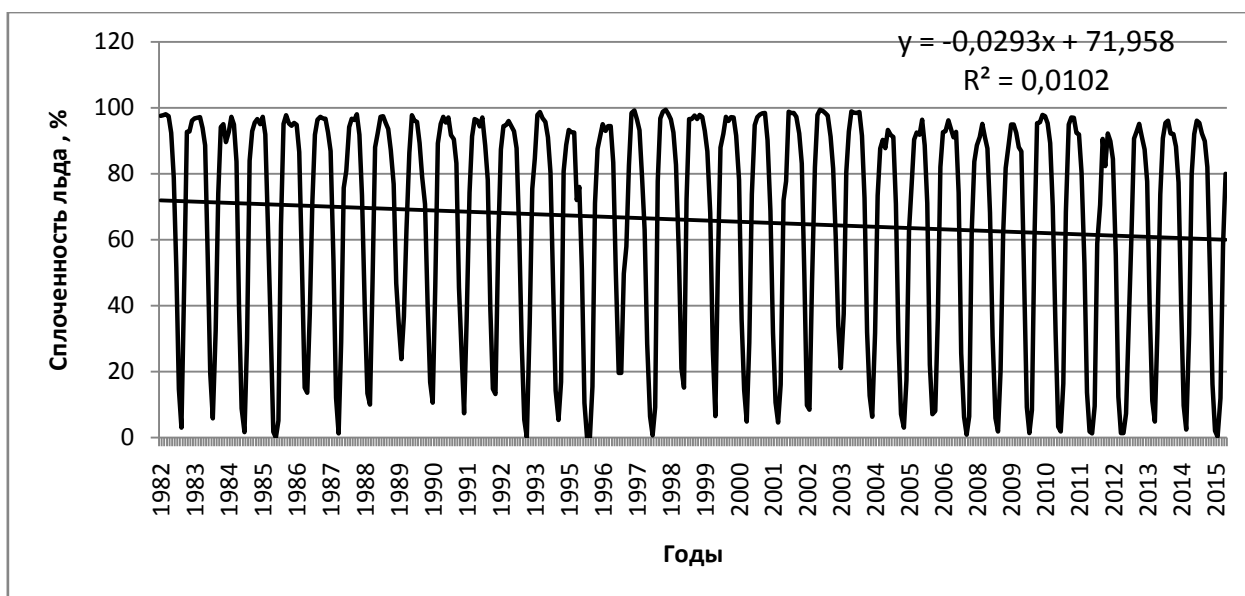


Рисунок 3.2.1 - среднемесячные значения сплоченности льда Карского моря в период с 1982 по 2015 года. Линейный тренд и уравнение тренда.

В среднемесечном временном ряду ледовитости Карского моря было вычислено два тренда: линейный и нелинейный. Как видно из таблицы 3.2.1 оба тренда оказались значимы, при уровне значимости 0,05. И оба вносят одинаковый вклад в дисперсию. Наличие значимых трендов в среднемесечном ряду свидетельствует о том, что тренд вносит действительно существенный вклад, так как ряд среднемесечных значений имеет большую дисперсию, а тренд виден на фоне этой дисперсии.

Таблица 3.2.1 – проверка значимости линейного и нелинейного тренда

линейный		нелинейный	
R =	0,10	R =	0,11
R ² =	0,01	R ² =	0,01
$\sigma(r)$ =	0,05	$\sigma(r)$ =	0,05
t* =	2,06	t* =	2,20
<u>tkp</u> =	1,97	<u>tkp</u> =	1,97
<u>tkp</u> < t* значим.		<u>tkp</u> < t* значим.	

Из двух трендов предпочтение было отдано линейному, так как разница в описании дисперсии ряда у них не значительна (менее 5%).

На акватории всего Карского моря в период с 1982 по 2015 гг. наблюдается отрицательный тренд. Что говорит об общей тенденции к снижению ледовитости Карского моря.

Рассматривая ряд среднегодовых значений, так же можно сказать, о наличии отрицательного тренда, который показан на рисунке 3.2.2

Уравнение линейного тренда ледовитости Карского моря имеет вид : $y = -0,3001x + 71,218$. Тренд был проверен на значимость при $\alpha = 0,05$ и оказался значимым. Следовательно в межгодовом ряду , так же наблюдается устойчивая многолетняя тенденция к снижению ледовитости Карского моря.

Так как год состоит из разных сезонов, по общим данным нельзя сказать,

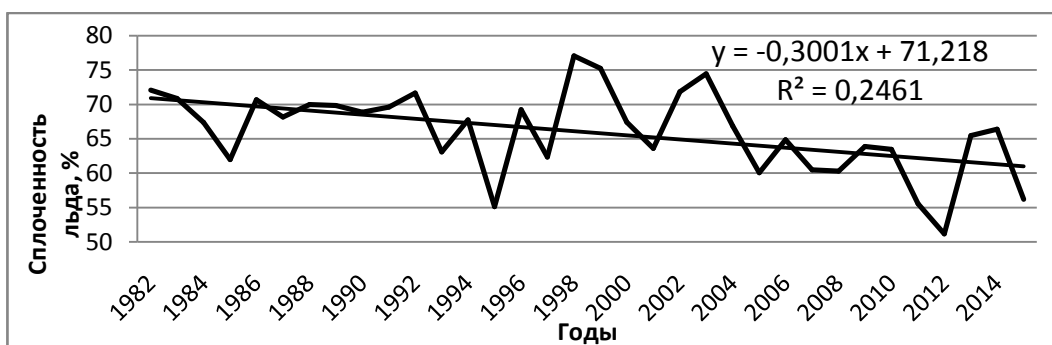


Рисунок 3.2.2 - среднегодовые значения сплоченности льда Карского моря в период с 1982 по 2015 года. Линейный тренд и уравнение тренда.

какой сезон именно наибольшее влияние оказывает на наличие отрицательного тренда, в каком сезоне он более выражен. Для этого были найдены линейные тренды для каждого из месяцев отдельно. На рисунке 3.2.2 представлены межгодовые колебания за все месяцы в период с 1982 по 2015 гг., а так же среднее значение и линейные тренды ледовитости, построенные по среднемесячным данным. Коэффициенты задающие линейный тренд ледовитости приведены в таблице 3.2.2.

Величина всех трендов имеет отрицательное значение. Как видно из рисунка 3.2.3 все тренды являются отрицательными.

Таблица 3.2.2 – Таблица коэффициентов, задающих уравнение линейных трендов ледовитости Карского моря и коэффициентов детерминации соответствующих моделей регрессии

месяц	Значения коэффициентов		Достоверность аппроксимации, R ²	месяц	Значения коэффициентов		Достоверность аппроксимации, R ²
	a	b			a	b	
январь	-0,12	97,38	0,1456	июль	-0,61	47,55	0,1863
февраль	-0,09	96,97	0,0592	август	-0,28	16,85	0,1076
март	-0,06	96,43	0,0838	сентябрь	-0,18	9,43	0,0795
апрель	-0,11	95,9	0,055	октябрь	-0,64	41,75	0,1433
май	-0,16	91,75	0,1058	ноябрь	-0,56	83,19	0,2027
июнь	-0,63	82,75	0,1781	декабрь	-0,3	93,68	0,1373

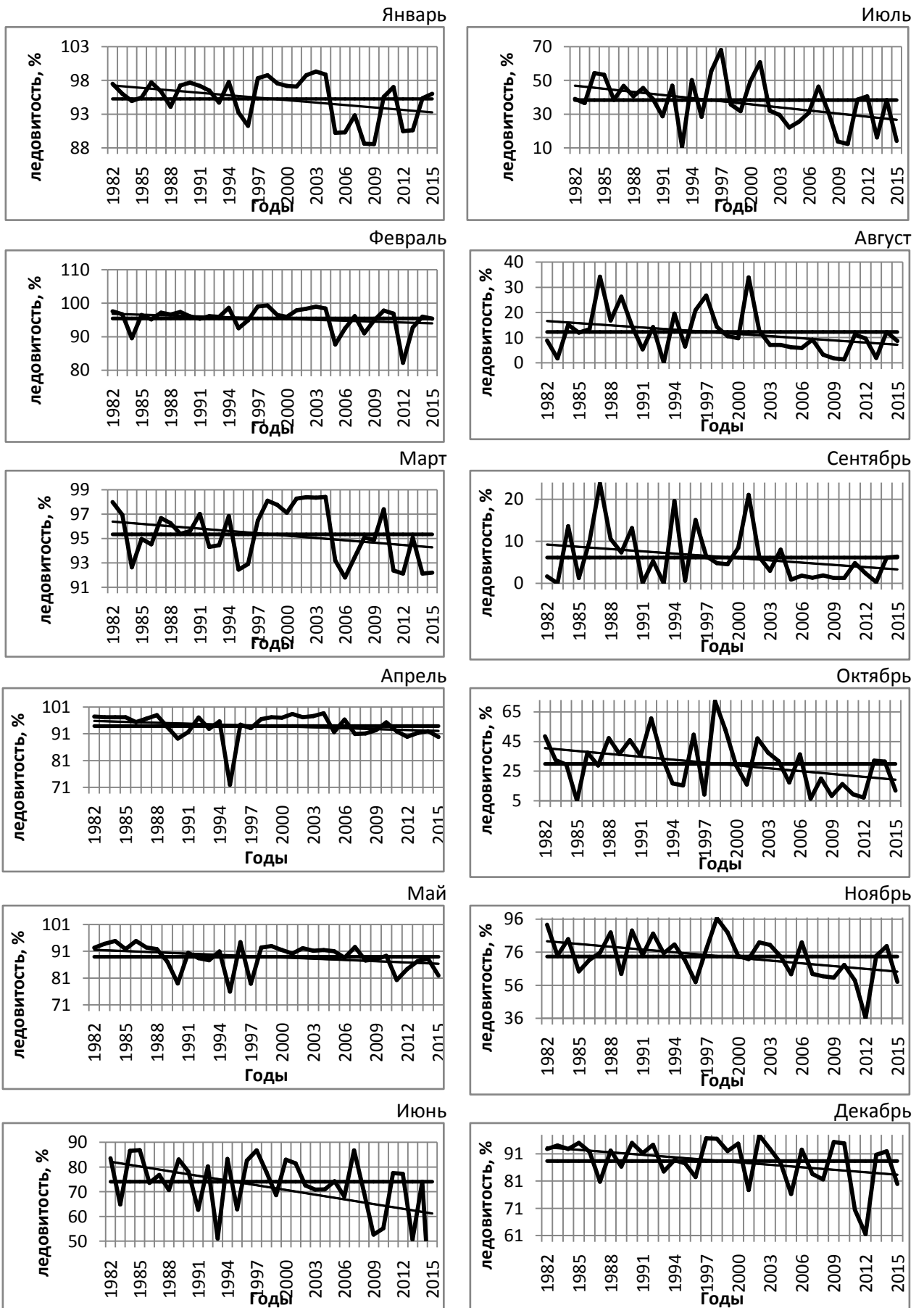


Рисунок 3.2.3 – межгодовые колебания, среднее значение и линейный тренд ледовитости Карского моря за все месяцы в период с 1982 по 2015 гг.

Все тренды были проверены на значимость при степени значимости 5%. Стоит отметить, что значимыми получились не все тренды. Для февраля, апреля и сентября тренды не значимы. Следовательно, можно сказать, что на общий среднегодовой ход существенного влияния не оказывают месяцы, в которые начинается период намерзания и таяние льда. Общий годовой ход определяется, прежде всего, двумя периодами с мая по август и с октября по декабрь, то есть периодами активного намерзания и таяния льда.

Рассмотрим теперь отдельно юго-западную и северо-восточную части Карского моря. На рисунках 3.2.4 и 3.2.5 представлены ряды среднемесячных и среднегодовых значений соответственно, в юго-западной части Карского моря. Для этой части моря так же были выбраны два тренда, линейный и нелинейный. Тренды были проверены на значимость (таблица 3.2.3) при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Оба тренда оказались незначимы для среднемесячного ряда, однако для среднегодовых значений, тренды получились значимы, это говорит о том, что в среднемесячном ряде, кроме внутрисезонного хода, не наблюдается никакой устойчивой тенденции и увеличению, или снижению ледовитости, на фоне большой дисперсии среднемесячного ряда тренд не проявился. В этой части моря хорошо выраженный и постоянный внутрисезонный ход.

Таблица 3.2.3 - проверка значимости линейного и нелинейного трендов по среднемесячным и среднегодовым данным по ледовитости в юго-западной части Карского моря

среднемесячные				среднегодовые			
линейный		нелинейный		линейный		нелинейный	
R =	0,08	R =	0,09	R =	0,40	R =	0,44
R ² =	0,01	R ² =	0,01	R ² =	0,16	R ² =	0,19
$\sigma(r)$ =	0,05	$\sigma(r)$ =	0,05	$\sigma(r)$ =	0,14	$\sigma(r)$ =	0,14
t* =	1,63	t* =	1,74	t* =	2,82	t* =	3,17
<u>t_{кр}</u> =	1,97	<u>t_{кр}</u> =	1,97	<u>t_{кр}</u> =	2,03	<u>t_{кр}</u> =	2,03
<u>t_{кр}</u> > t* незначим.		<u>t_{кр}</u> > t* незначим.		<u>t_{кр}</u> < t* значим.		<u>t_{кр}</u> < t* значим.	

Однако рассматривая многолетнюю среднегодовую изменчивость, наблюдается отрицательный тренд. Что говорит, о снижении ледовитости в этой части моря.

На рисунке 3.2.4 видно, что линия тренда имеет не большой угол наклона и коэффициент детерминации R^2 очень мал. Так же видно, что многолетний среднемесячный ряд имеет хорошо выраженный внутрисезонный ход.

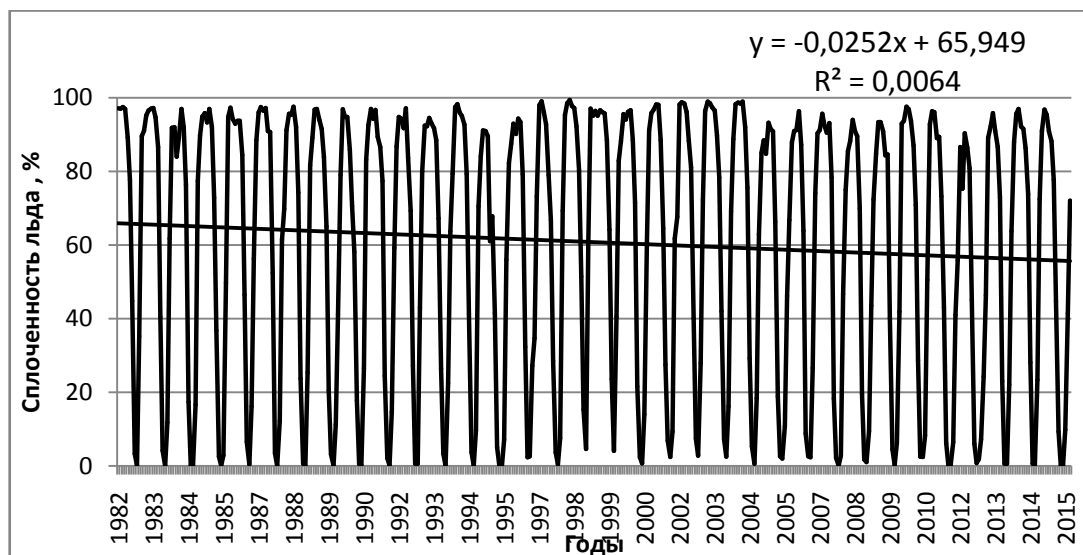


Рисунок 3.2.4 - среднемесячные значения сплоченности льда в юго-западной части Карского моря в период с 1982 по 2015 года. Линейный тренд и уравнение тренда.

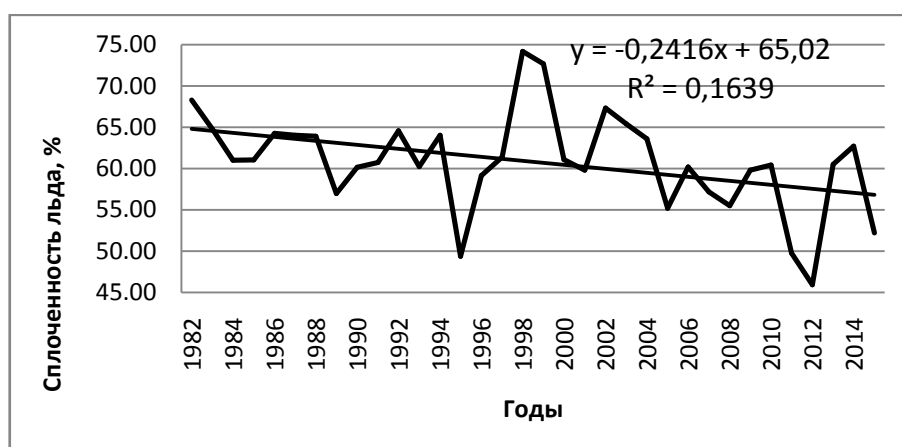


Рисунок 3.2.5 - среднегодовые значения сплоченности льда в юго-западной части Карского моря в период с 1982 по 2015 года. Линейный тренд и уравнение тренда.

На графике среднегодовых значений ледовитости в юго-западной части Карского моря (рисунок 3.2.5) линия тренда имеет более сильный угол наклона и коэффициент детерминации R^2 является значимым, что говорит о наличии тренда. . Как и для данных по всему морю, в его юго-западной части тренд является отрицательным, что говорит о снижении ледовитости, за рассматриваемый период времени.

Для северо-восточной части Карского моря, так же свойственно наличие линейного и нелинейного тренда. Проверка на значимость приведена в таблице 3.2.4.

Таблица 3.2.4 - проверка значимости линейного и нелинейного трендов по среднемесячным и среднегодовым данным по ледовитости в северо-восточной части Карского моря

среднемесячные				среднегодовые			
линейный		нелинейный		линейный		нелинейный	
R =	0,13	R =	0,14	R =	0,50	R =	0,54
R ² =	0,02	R ² =	0,02	R ² =	0,25	R ² =	0,29
$\sigma(r)$ =	0,05	$\sigma(r)$ =	0,05	$\sigma(r)$ =	0,13	$\sigma(r)$ =	0,12
t* =	2,70	t* =	2,89	t* =	3,90	t* =	4,37
<u>t_{кр}</u> =	1,97	<u>t_{кр}</u> =	1,97	<u>t_{кр}</u> =	2,03	<u>t_{кр}</u> =	2,03
<u>t_{кр}</u> < t* значим.		<u>t_{кр}</u> < t* значим.		<u>t_{кр}</u> < t* значим.		<u>t_{кр}</u> < t* значим.	

Как видно по рисункам 3.2.6 – 3.2.7 в северо-восточной части моря так же наблюдаются отрицательные тренды. Однако, им свойственен более выраженный характер, нежели для юго-западной части моря. Это говорит о том, что льды северо-восточной части Карского моря за последние 33 года претерпели большие изменения. В юго-восточной части процесс ледообразования и таяния является более стационарным, и внешние условия не

оказывают на него сильного влияния в этот период. В северо-восточной же части изменения несут более выраженный характер.

За последние три десятилетия наблюдается отрицательный тренд ледовитости, приводящий к ежегодному уменьшению льда. Однако, в

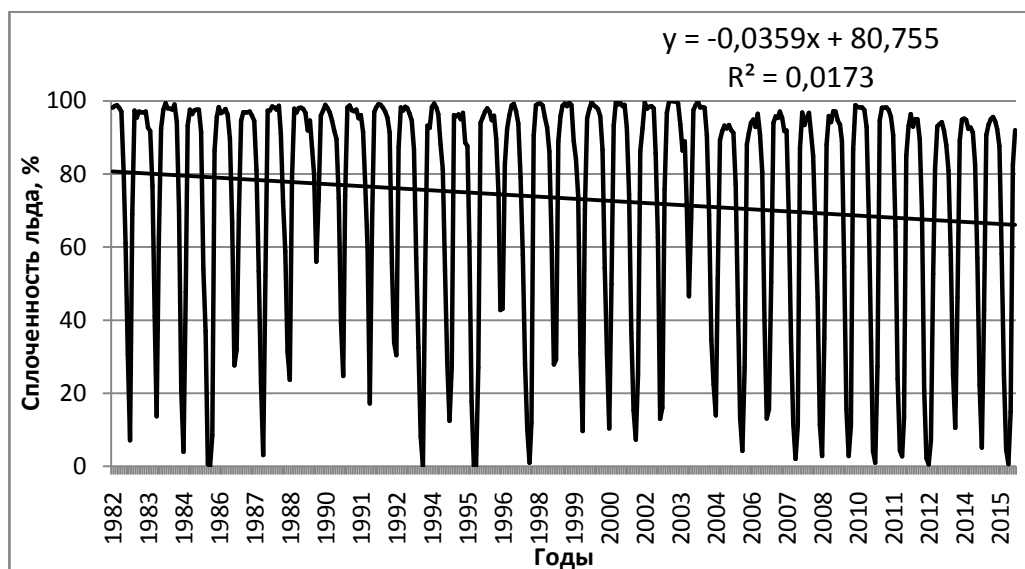


Рисунок 3.2.6 - среднемесячные значения сплоченности льда в северо-восточной части Карского моря в период с 1982 по 2015 года. Линейный тренд и уравнение тренда.

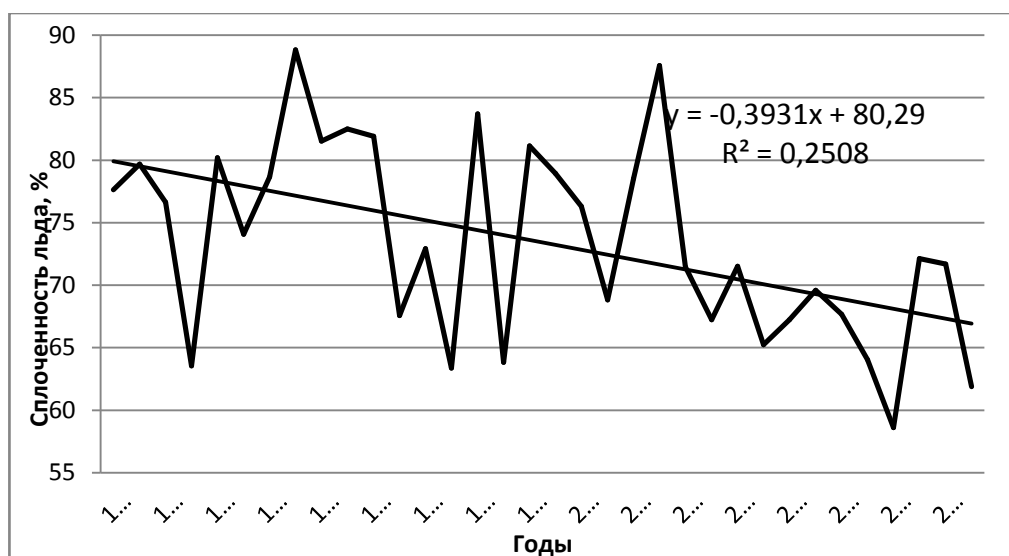


Рисунок 3.2.7 - среднегодовые значения сплоченности льда в северо-восточной части Карского моря в период с 1982 по 2015 года. Линейный тренд и уравнение тренда.

Как можно заметить по рисунку 3.2.7 в северо-восточной части моря можно проследить некий скачок. С 1982 года по 2005 на фоне общего линейного тренда изменений ледовитости не было в 2005 же году наблюдается резкий скачок. Начиная с этого года ледовитость в северо-восточной части моря значительно снизилась.

В зависимости от длины анализируемой базы знак тренда может меняться. Причиной перемены знака линейного тренда является чередование длительных периодов пониженной и повышенной ледовитости, продолжительность которых составляет по данным приведенным в [6] примерно 24 года каждый.

Из полученных в данной работе данных, можно сделать вывод, что анализируемый период относится к периоду уменьшения ледовитости, однако достаточно скоро наступит период ее увеличения.

Общее снижение ледовитости Карского происходит на фоне общего потепления климата. На фоне изменения температурного режима приповерхностного слоя воздуха происходят так же и изменения в ледообразовании. От температуры воздуха в октябре-апреле и в июне, зависит толщина выросшего льда зимой и интенсивность его таяния летом. Таким образом, можно сделать предположение, что основной причиной наблюдаемых многолетних изменений ледовитости моря являются соответствующие изменения циркуляции с северной полярной области.

На разницу в интенсивности уменьшения ледовитости в двух частях Карского моря могут оказывать влияние различные географические, климатические и гидрометеорологические факторы.

3.3 Гармонический анализ

Как уже говорилось ранее, для описания периодических и квазипериодических процессов используется гармонический анализ. С его помощью была произведена оценка наличия скрытых периодичностей в

колебании ледовитости Карского моря.

Для всей акватории Карского моря и в отдельности, для его юго-западной и северо-восточной частей, по среднемесячным и среднегодовым значениям ледовитости были рассчитаны гармоники. Для среднегодовых значений, были выбраны два периода, годовая и полугодовая гармоники значения которых приведены в таблицах 3.3.1 и 3.3.2. Гармоники были проверены на значимость, при уровне значимости 5% и обе оказались значимы.

Для определения основных периодов в среднегодовом временном ряду был использован метод БПФ. По спектрограмме представленной на рисунке 3.3.3 были выбраны гармоники, имеющие наибольшую дисперсию, то есть представленные «пиками» на соответствующем графике спектра.

Таблица 3.3.1 – годовая гармоника ледовитости Карского моря

Период	12 мес.	$t^* > t_{кр}$ – гармоника значима
Амплитуда (A_n)	43,2	
Фаза (φ_n)	1,34	
Дисперсия	932,9	
Общая дисперсия	1156,73	
Вклад гармоник в общую дисперсию	0,81	
t^*	93,74	
$t_{кр}$	1,97	

Таблица 3.3.2 – полугодовая гармоника ледовитости Карского моря

Период	6 мес.	$t^* > t_{кр}$ – гармоника значима
Амплитуда (A_n)	16,88	
Фаза (φ_n)	-0,4	
Дисперсия	142,5	
Общая дисперсия	1156,73	
Вклад гармоник в общую дисперсию	0,12	
t^*	8,09	
$t_{кр}$	1,97	

Из представленных данных, по среднемесячным значениям, видно, что годовая гармоника имеет гораздо большую амплитуду колебаний, и так же вносит гораздо больший вклад в общую дисперсию исходного ряда. Годовая гармоника показывает сезонный ход ледовитости, по ней хорошо просматриваются периоды нарастания и таяния льда. Полугодовая же гармоника не является физическим процессом, она отражает негармонические (нелинейные) изменения годового хода ледовитости. Такой не линейный ход может быть обусловлен наличием длинного зимнего периода, и короткого летнего. На рисунках 3.3.1 и 3.3.2 видно, что годовая гармоника имеет гораздо большую амплитуду.

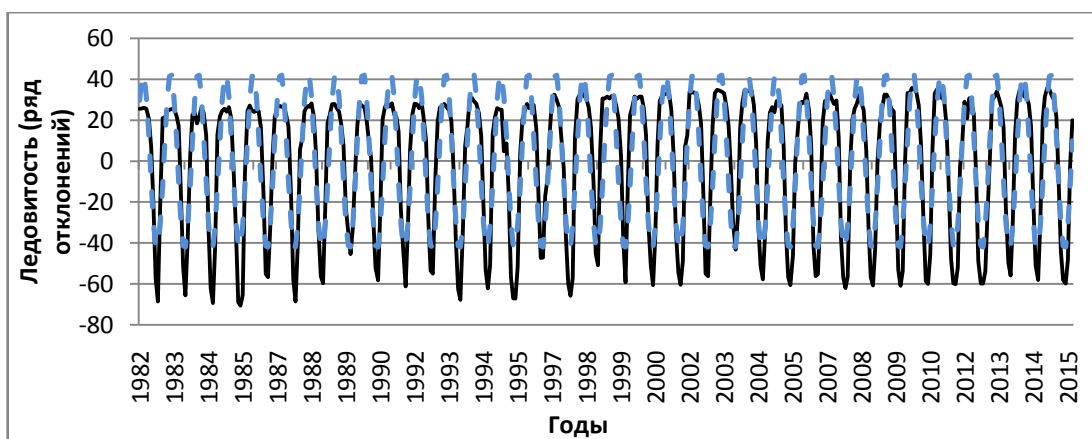


Рисунок 3.3.1 – ряд отклонений ледовитости Карского моря (с удаленным линейным трендом) и годовая гармоника данной характеристики

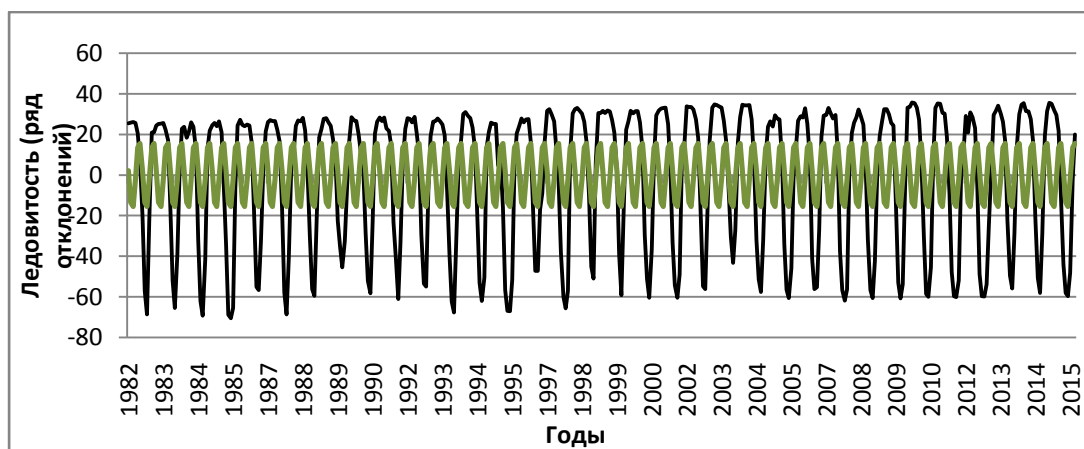


Рисунок 3.3.2 ряд отклонений ледовитости Карского моря и полугодовая гармоника данной характеристики

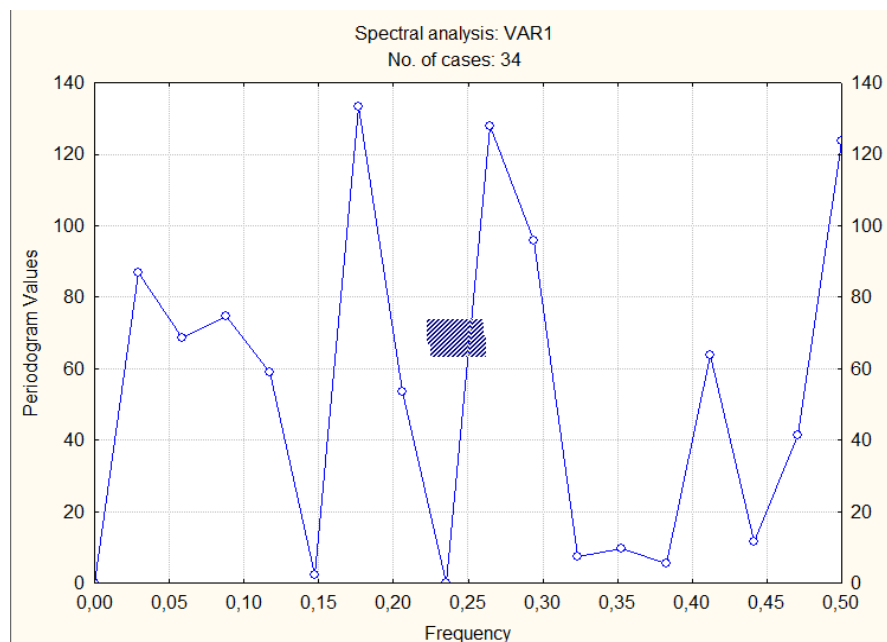


Рисунок 3.3.3 периодограмма среднегодовых значений ледовитости Карского моря

По данным спектрограммы были выявлены 3 периода, с наибольшей дисперсией, в 5,7; 3,8; 2 года. Все три гармоники, были проверены на значимость (таблица 3.3.3) и оказались значимы.

Таблица 3.3.3 Составляющие гармонического анализа и значимость гармоник

Период	5,7 лет	3,8 лет	2 года
Амплитуда (A_n)	2,68	2,76	2,7
Фаза (φ_n)	-0,41	1,53	-3,14
Дисперсия	3,6	3,82	3,64
Общая дисперсия	26,56	26,56	26,56
Вклад гармоник в общую дисперсию	0,14	0,14	0,14
t^*	2,48	2,58	2,5
$t_{кр}$	2,03	2,03	2,03
Значимость	значим	значим	значим

Можно отметить, что ритмы продолжительностью 2,0 – 3,5 лет относятся к 2 – 3-летней, или же квазидвухлетней изменчивости, которая прослеживается в различных составляющих гидрометеорологической оболочки Земли. Эта изменчивость связана с собственным функционированием приземной атмосферы. Ритм же в 5,7 лет, можно отнести к 6 летнему циклу связанному с нутацией Земли. По данным изв целом для Карского моря на квазидвухлетнюю периодичность приходится 55%, а на десятилетнюю – 45% ледовой изменчивости, т.е. наблюдается определенный ритмический паритет. [12]

Рассматривая отдельный анализ юго-западной и северо-восточной частей моря можно выделить более сложный характер природных зависимостей.

На основе среднемесячных данных так же выделяются две гармоника, годовая и полугодовая. Все оценки и проверки на значимость приведены в таблицах 3.3.4 – 3.3.5.

Таблица 3.3.4 – полугодовая гармоника ледовитости в юго-западной части Карского моря

Период	6 мес.	12 мес.
Амплитуда (A_n)	16,88	47,88
Фаза (φ_n)	-0,4	1,38
Дисперсия	142,5	1146,04
Общая дисперсия	1156,73	1372,46
Вклад гармоник в общую дисперсию	0,12	0,84
t^*	8,09	111,88
$t_{кр}$	1,97	1,97
Значимость	значима	значима

Как видно по данным таблице 3.3.4 для юго-западной части моря обе гармоника значимы. Амплитуда годовой гармоника больше амплитуды полугодовой, и она так же вносит больший вклад в общую дисперсию ряда.

Как уже говорилось наличие полугодовой гармоника отображает неоднородность сезонного хода. Это обуславливается тем, что в данном регионе зимы имеют более длительный период, и выражены интенсивнее лета.

Таблица 3.3.6 – годовая полугодовая гармоника ледовитости в северо-восточной части Карского моря

Период	6 мес.	12 месяцев
Амплитуда (A_n)	16,08	37,04
Фаза (φ_n)	-0,36	1,25
Дисперсия	129,22	685,99
Общая дисперсия	1372,46	1015,57
Вклад гармоник в общую дисперсию	0,09	0,68
t^*	6,84	51,15
$t_{кр}$	1,97	1,97
Значимость	значима	значима

Для северо-восточной части моря характерна аналогичная картина. Гармоники являются значимыми и наиболее существенный вклад вносит годовая гармоника.

На основе приведенных данных можно сказать, что в обеих частях моря присутствует хорошо выраженный сезонный ход ледовитости, связанный с замерзанием и таянием льда.

По среднегодовым значениям для обеих частей моря были получены спектрограммы представленные на рисунках 3.3.4 -3.3.5.

При помощи рассчитанных в программе Statistica спектральных характеристик и полученных графиков периодограммы, были выбраны несколько наиболее значимых периодов, представленных на графике периодограммы в виде экстремумов функции. Для каждой части Карского моря, как для юго-западной, так и для северо-восточной, характерно наличие 3 значимых периодов.

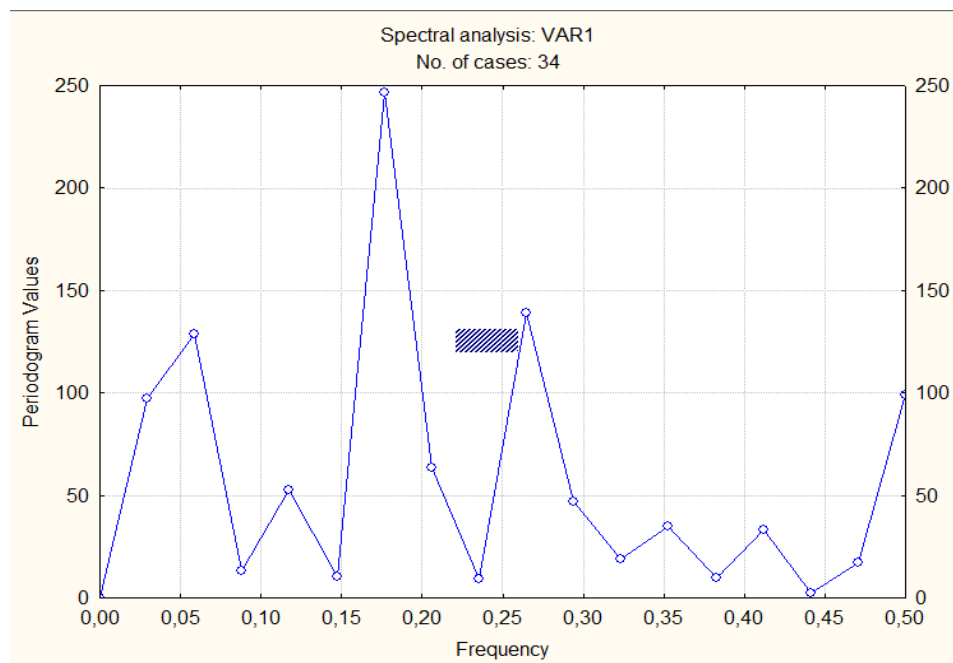


Рисунок 3.3.4 периодограмма среднегодовых значений ледовитости в юго-западной части Карского моря

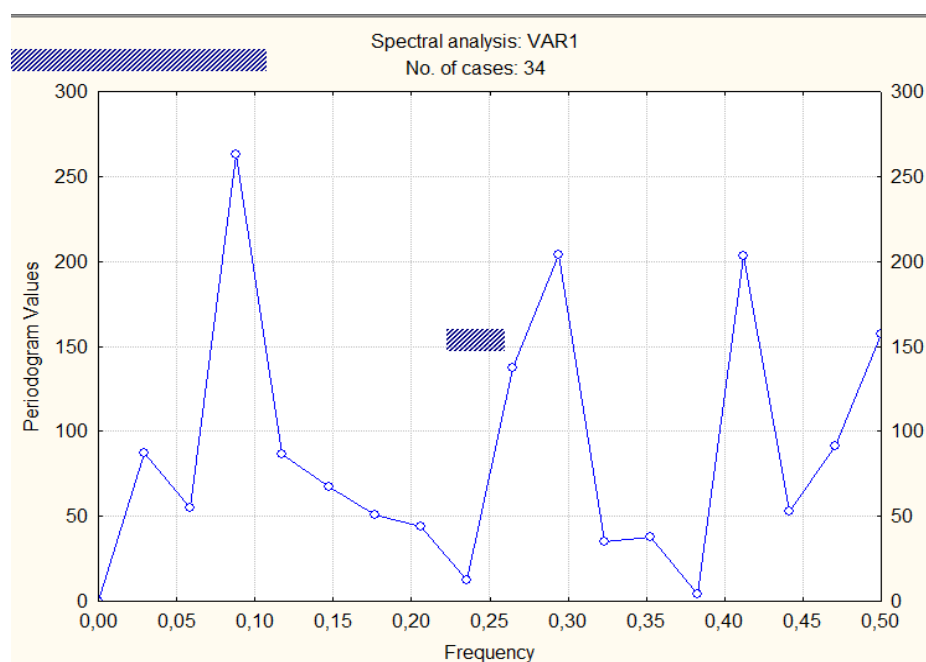


Рисунок 3.3.4 периодограмма среднегодовых значений ледовитости в северо-восточной части Карского моря

Для юго-западной части были выделены гармоники с периодами 5,6; 3,8; 17 лет . Для северо-восточной 2,4; 3,4; 11 лет. Из чего видно, что ледовые

ритмы в двух частях моря значительно отличаются. Для всех этих периодов была проведена оценка значимости гармоник результаты которой представлены в таблицах 3.3.8 – 3.3.9.

Таблица 3.3.8 – Составляющие гармонического анализа и значимость гармоник юго-западной части Карского моря

Период	3,8 лет	5,6 лет	17 лет
Амплитуда (A_n)	3,01	3,72	3,76
Фаза (φ_n)	0,23	0,19	1,21
Дисперсия	3,6	6,91	7,07
Общая дисперсия	33,92	33,92	33,92
Вклад гармоник в общую дисперсию	0,13	0,20	0,21
t^*	2,46	3,3	3,36
$t_{кр}$	2,03	2,03	2,03
Значимость	значим	значим	значим

Таблица 3.3.9 – Составляющие гармонического анализа и значимость гармоник северо-восточной части Карского моря

Период	2,4 года	3,4 года	11 лет
Амплитуда (A_n)	3,04	3,46	3,74
Фаза (φ_n)	-1,54	-0,44	-1,04
Дисперсия	4,61	5,99	6,98
Общая дисперсия	44,43	44,43	26,56
Вклад гармоник в общую дисперсию	0,1	0,13	0,16
t^*	2,1	2,48	2,74
$t_{кр}$	2,03	2,03	2,03
Значимость	значим	значим	значим

После проверки на значимость подтвердилось, что все гармоники в обеих

частях моря являются значимыми. При этом для юго-восточной части преобладающей является квазидвухлетняя ритмичность, а для северо-западной десятилетняя. Исходя из этого, можно сделать вывод, что наиболее важной особенностью в многолетнем формировании ледового режима является преобладание в юго-западной части Карского моря относительно долгопериодных колебаний ледовитости (продолжительностью от 3,8 лет), а в северо-восточной части моря напротив, относительно короткопериодных колебаний, продолжительностью около 2-3,5 лет.

Разница в ритмичности ледовых процессов в юго-западной и северо-восточной частях Карского моря может быть обусловлена особенностями нарастания ледяного покрова в зимний период и его таянием в летний.

3.4 Прогноз ледовитости Карского моря до 2020 года

Путем экстраполяции полученных данных был составлен прогноз ледовитости Карского моря в целом, а так же отдельно для его юго-западной и северо-восточной частей. Полученные результаты представлены на рисунках 3.4.1 – 3.4.3.

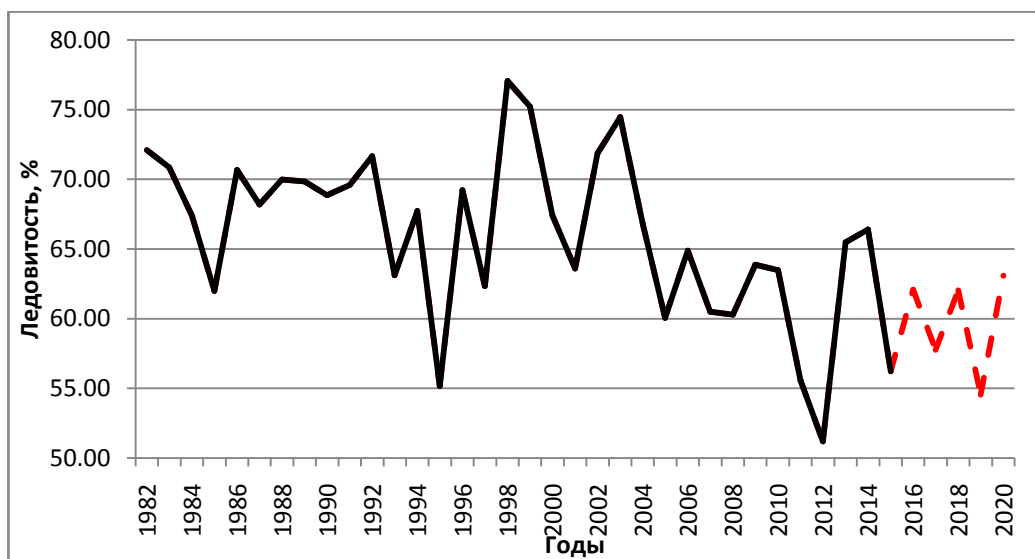


Рисунок 3.4.1 – прогноз ледовитости Карского моря до 2020 года

Исходя из результатов расчета видно, что в ближайшие пять лет будет наблюдаться тенденция к снижению ледовитости на общей акватории Карского моря.

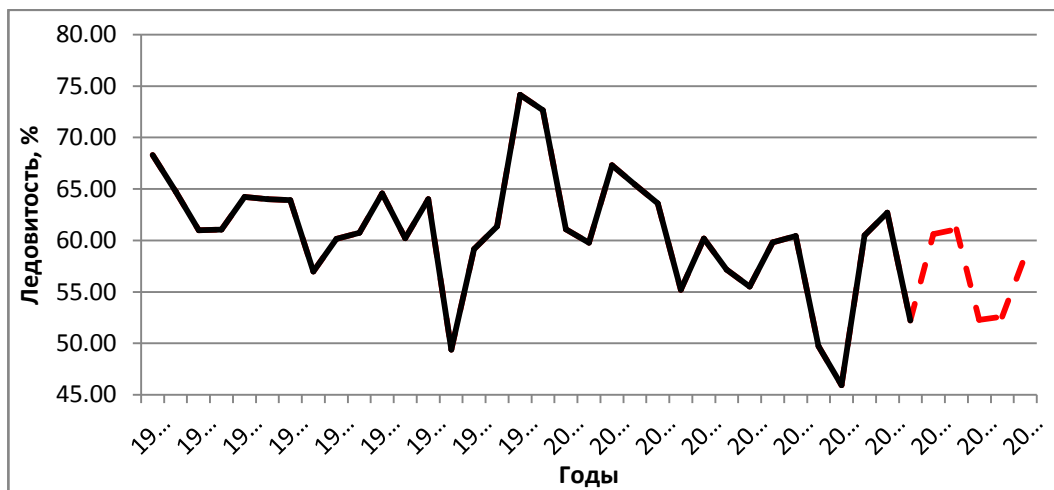


Рисунок 3.4.2 – прогноз ледовитости в юго-западной части Карского моря до 2020 года

В юго-западной части моря наблюдается квазидвухлетний период, однако не выявляется уменьшения ледовитости на фоне общего ряда данных. В ближайшие 5 лет ледовитость данной части моря останется примерно на том же уровне, который мы наблюдаем сейчас.

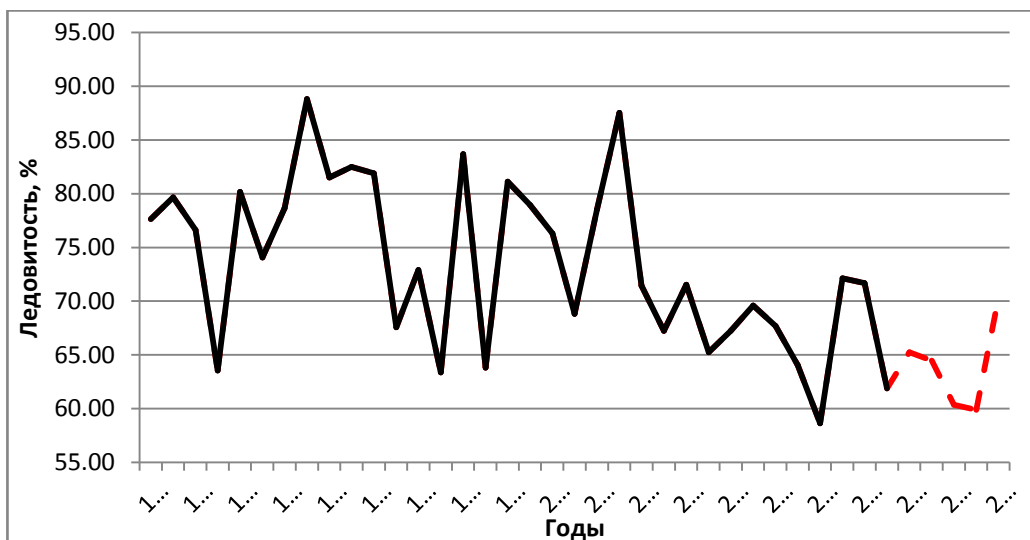


Рисунок 3.4.3 – прогноз ледовитости в северо-восточной части Карского моря до 2020 года

В северо-восточной части моря по полученным данным можно сказать, что до 2019 года будет наблюдаться снижение ледовитости, с 2020 возможен ее рост.

В целом по полученным данным видно, что большее влияние на совокупную акваторию Карского моря оказывает его юго-западная часть.

Полученный прогноз подтверждает данные о том, что в настоящий период идет снижение ледовитости арктических морей, в частности Карского моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время ледовитость Карского моря представляет особый интерес, в связи с потеплением климата. Данная работа позволяет получить достаточное представление о состоянии ледовитости в период с 1982 по 2015 гг. А так же о возможности привлечения рассматриваемых статистических характеристик к прогнозированию ледовых условий в Карском море.

Использование данных с искусственных спутников Земли показало возможность ежемесячного прослеживания состояний ледового покрова Карского моря.

В результате проведенного исследования, мы подтвердили гипотезу о том, что в настоящее время ледовитость Карского моря снижается. Это благоприятно сказывается на освоении данной территории.

В работе было исследовано как все Карское море, так и в отдельности его две части юго-западная и северо-восточная. Проведенные расчеты и анализ подтвердили независимость в процессе ледообразования этих двух частей, и разных ледовых режимов. Однако можно заметить, что большее влияние на состояние ледяного покрова Карского моря оказывает его юго-западная часть.

По средним значениям ледовитости прослеживается разница в ледовом режиме юго-западной и северо-восточной частей. В летний период море состоит из двух разных по ледовым условиям частей. В то время, как в юго-западной части акватория почти полностью очищается, на северо-востоке моря наблюдается наличие остаточных льдов, и полного очищения не происходит. Однако в зимний период море представляет собой единый ледовый массив практически однородный по всей акватории.

Исходя из проведенного трендового анализа можно сделать выводы о том, что на протяжении всего исследуемого периода наблюдаются отрицательные тренда в ледовитости моря. Однако наибольшее влияние на снижение ледовитости происходит в сезон активного намерзания и таяния льда. Тогда как такие месяцы как январь – март, а так же сентябрь не вносят особого

вклада в уменьшение ледовой обстановки Карского моря. При рассмотрении в отдельности каждой части моря видно, что наиболее сильные изменения происходят в его северо-восточной части.

На территории Карского моря хорошо прослеживается внутри годовой ход ледовитости. Однако в связи с преобладанием зимнего периода, над летним в годовом ходе хорошо прослеживаются не гармонические колебания ледовитости. Так же многолетняя изменчивость состояния ледяного покрова Карского моря характеризуется наличием колебаний периодами 2; 3,8 и 5,7 лет. Колебания в 2-3,8 лет связаны с собственным функционированием приземной атмосферы. Ритм же в 5,7 лет, можно отнести к 6 летнему циклу связанному с нутацией Земли. Однако в отдельных частях Карского моря мы наблюдаем разное сочетание гармоник в его юго-западной части колебания составляют 3,8; 5,6 и 17 лет, в северо-восточной 2,4; 3,4 и 11 лет. Разные ритмы опять таки указывают на различия в формировании ледового режима в двух частях моря. Исходя из этого можно сделать вывод, что наиболее важной особенностью в многолетнем формировании ледового режима является преобладание в юго-западной части Карского моря относительно долгопериодных колебаний ледовитости (продолжительностью от 3,8 лет), а в северо-восточной части моря напротив, относительно короткопериодных колебаний, продолжительностью около 2-3,5 лет.

В целом видно, что периодические колебания всего моря зависят в наибольшей степени от колебаний в юго-западной части моря, в то время, как северо-восточная часть имеет свой более краткосрочный период колебаний.

На основе полученного по произведенным расчетам прогноза можно сделать вывод о том, что вплоть до 2020 года будет наблюдаться дальнейший спад ледовитости. Это должно положительно сказаться на освоении ресурсов Карского моря. Однако нельзя сказать сколько еще продлится период уменьшения ледяного покрова моря. В связи с этим изучение и прогнозирование оценок ледового покрова Карского моря является актуальным.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Атлас океанов. Северный ледовитый океан. М.: ГУНИО МО, 1980. 190 с.
2. Васильев А.Н. Взаимодействие речных и морских вод в Обской устьевой области // Труды ААНИИ, Гидрология устьевых рек Сибири, Т 314. Ленинград: Гидрометеоздат, 1976.
3. Дмитриев А.А. Динамика атмосферных процессов над морями Российской Арктики. СПб.: Гидрометиздат, 2000. 233 с.
4. Государственный научный центр "Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. URL: www.aari.ru/ (дата обращения: 06.04.2016).
5. Карелин И.Д. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века: Режимно-справочное пособие/ Карелин И.Д, Карклин В.П. – СПб: ААНИИ, 2012. 180 с.
6. Алексеев Г.В., Заблотский Г.А., Макштас А.П. О постановке наблюдений за потоками тепла и влаги, таянии и нарастании льда на поверхности разводьев и молодых льдов в Арктическом бассейне. Л.: Гидрометиздат, 1975. С. 143-147.
7. Ледяные образования морей западной арктики: Монография/ Зубакин Г.К. – СПб : ААНИИ, 2006. 272 с.
8. Борочаев, В.Е. Льды Карского моря. СПб.: Гидрометиздат, 1998. 182 с.
9. Библиотека климатических данных. URL <http://iridl.ldeo.columbia.edu/> (дата обращения 13.04.2016).
10. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации» – СПб.: РГГМУ, 2010. – 74с.
11. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник.– СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 404 с.
12. Карклин В.П. Квазидвухлетние влияния в изменениях ледовитости арктических морей // Труды ААНИИ. 1976. Т. 341. С. 119–142.