

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

Допущена к защите  
Зав. кафедрой к.ф.-м.н., доцент  
*Т.Р.Еремина*  
Т.Р.Еремина  
10.06.2016

Кафедра промышленной океанологии и  
охраны природных вод

ВЫПУСКНАЯ  
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)  
Ледовые условия на Северном морском пути  
в современных климатических условиях

Выполнила	Ю.Г.Сызранова гр. О-55
Руководитель	к.г.н., доцент С.М. Гордеева

Санкт-Петербург 2016

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего 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

**ВЫПУСКНАЯ  
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)  
Ледовые условия на Северном морском пути  
в современных климатических условиях**

Выполнила	Ю.Г.Сызранова гр. О-55
Руководитель	к.г.н., доцент С.М. Гордеева

Санкт-Петербург 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
СОКРАЩЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. ХАРАКТЕРИСТИКА СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ	6
1.1 Климат Арктики	7
1.2 История освоения Северного морского пути	7
1.3 моря Северного морского пути	10
1.3.1 Карское море	10
1.3.2 Море Лаптевых	12
1.3.3 Восточно-Сибирское море	14
1.3.4 Чукотское море	16
1.4 Трассы Северного морского пути	18
1.5 Характеристика льда	19
1.6 Ледяные массивы	21
1.7 Развитие транспортной системы	23
1.8 Экономические перспективы Северного морского пути	24
2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	26
2.1 Исходные данные	26
2.2 Методы статистического исследования	27
2.2.1 Среднее арифметическое и стандартное отклонение	27
2.2.2 Анализ временного тренда	27
2.2.3 Корреляционный анализ	28
3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВИТОСТИ И ДРУГИХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА СЕВЕРНОМ МОРСКОМ ПУТИ	30
3.1 Изменчивость ледовитости на Северном морском пути	30

3.2	Изменчивость температуры воздуха	37
3.3	Изменчивость зональной и меридиональной составляющих ветра	41
3.4	Связь ледовитости с гидрометеорологическими характеристиками	49
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	53
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	55

## СОКРАЩЕНИЯ

1. СМП-Северный морской путь;
2. Севморпуть-Северный морской путь;
3. НЗМ-Новоземельский ;
4. СЗМ-Североземельский ;
5. КСМ-Карский Северный ;
6. ТМ-Таймырский;
7. ЯМ-Янский;
8. НМ-Новосибирский;
9. АМ-Айонский;
10. ВМ-Врангельский;
11. ЧСМ-Чукотский Северный.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все чаще стали говорить о политическом значении арктического региона. Президент России Владимир Владимирович Путин говорил о Северном морском пути (СМП): «Потепление климата открывает перед Россией новые возможности по экспансии в Арктике».[1]

Северный морской путь проходит по арктическим морям, таким как Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское. Длина пути от Карских ворот до бухты Проведения составляет 5,6 тысяч километров.

Преимущество СМП перед другими морскими маршрутами( Суэцкий и Панамский проливы) — меньшее расстояние. СМП сокращает дистанцию примерно на 34%. Ещё одно преимущество-это безопасность. У Суэца проблема безопасности подразумевает под собой сомалийских пиратов.

Помимо транзита Севморпуть интересен крупным российским компаниям - «Норильский никель», «Газпром нефть», «Роснефть».

Самой главной причиной использования СМП является потепление климата. В 2014 году Росгидромет опубликовал доклад на тему: «Изменения климата и их последствия на территории РФ». Там говорится что, в России скорость потепления климата выше, чем мировые темпы в два раза, Ледовитый океан может освободиться ото льда уже во второй половине XXI века. Период навигации увеличится, снизятся издержки эксплуатации пути.

В связи с этим целью работы является исследование межгодовой и межсезонной изменчивости ледовитости на Северном морском пути, для чего были поставлены задачи:

- сформировать среднемесячные и среднегодовые (сезонные) ряды ледовитости СМП;
- исследовать временную изменчивость ледовитости СМП и других гидрометеорологических характеристик;
- выяснить связь ледовитости СМП и других гидрометеорологических характеристик.

## 1 ХАРАКТЕРИСТИКА СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Северный морской путь (СМП) – морская транспортная трасса Арктических морей (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) и Берингова моря вдоль Северного Евразийского побережья. Кратчайший путь из Европы в Азию. У него нет единого маршрута. В законодательстве Российской Федерации определяется как «Исторически сложившаяся национальная единая транспортная коммуникация России в Арктике», а судоходством — как «Навигационно-рекомендованная трасса от Новой Земли до Берингова пролива». Трасса делится на две части: западную (от Мурманска до Дудинки) и восточную (от Дудинки до Чукотки). Границы СМП обозначены на западе входами в новоземельские проливы, на востоке Беринговым проливом, а не севере меридианом от мыса Желания.

В формирование Севморпути непосредственное участие принимают северные реки - Обь, Енисей, Лена, Индигирка и др.

Протяженность трассы 5600 км, это на 8000 короче, чем через Суэцкий канал. Навигация продолжительностью 2-4 месяца. На отдельных маршрутах, с использованием ледоколов, навигация может продолжаться значительно дольше.[2]

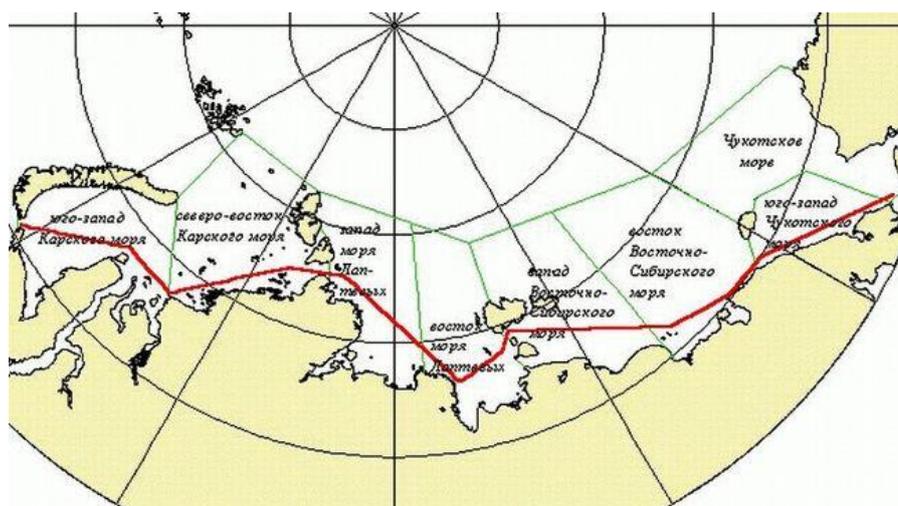


Рисунок 1.1-Трасса Северного морского пути [3]

## 1.1 Климат Арктики

Так как СМП проходит по арктическим морям, то можно судить о климате Арктики в целом. Климат Арктики считается суровым и холодным, но в результате появления циклонов, температура может резко вырасти до плюсовых значений.

Воздух здесь холоднее воды. Температура воздуха сибирского бассейна — минус 50°C, на Чукотском море температура воздуха — минус 36°C.

Во время полярной ночи температура воздуха постоянно понижается, потому что в это время ни света, ни тепла не поступает. Когда наступают полярные сутки, большие объемы тепла и света поглощаются снегом и льдом. Районы, которые прилегают к акваториям Атлантического и Тихого океанов, теплее и там больше осадков, а климат внутренних районов холоднее и суше.

Зимой в Арктике усиливаются действия циклонов со стороны Атлантического океана. В это время высокие показатели температуры воздуха, сильные ветра, максимальное количество осадков и облачность. В сибирской части Арктики действуют антициклоны. Ветра здесь незначительные, очень низкие показатели температур, мало осадков.

Температура в арктическом бассейне летом 0-5°C, очень влажно (до 98%), частые туманы, осадки в виде мокрого снега и дождя, умеренные ветра.[9]

## 1.2 История освоение Северного морского пути

История освоения Северного морского пути началась когда было положено начало мореплаванию в арктических водах, на том этапе путешествия были ограничены пределами полосы берега, потому что было в распоряжении людей на тот момент – это лодка, гарпун и каменный топор.

До начала прошлого века северный морской путь называли Северо-Восточным морским проходом. О возможности практического использования данного пути в 1525 году говорил русский дипломат Д.Герасимов. В историю вписан также поход казака из Якутии Семена Дежнева, который доказал существование пути по морю из Северного Ледовитого океана в Тихий.

Огромный вклад внес М.Ломоносов. Ему принадлежит гипотеза о наличии генерального дрейфа льдов Арктического бассейна Восточно-Западного направления, систематизация льдов (во многом похожая на сегодняшнюю).

На СМП были проведены такие экспедиции как: камчатскими экспедициями Беринга, новоземельскими Циволько, Пахтусова, Литке, высокоширотным путешествием Чичагова, Северо — Восточным Биллингса — Сарычева и пр.

Первые научные экспедиции были проведены в начале XX века прошедшие Северным морским путем: экспедиция на первом линейном ледоколе «Ермак», полярные экспедиции на шхунах «Заря» и «Святая Анна», полюсная экспедиция «Святого Фоки» под руководством Седова и др. Так же была проведена гидрографическая экспедиция Вилькицкого на ледоколах «Вайгач» и «Таймыр», открывшая в 1913 году Северную Землю. Суда прошли в восточном и западном направлениях и после зимовки в сентябре 1915 года дошли до Архангельска.

Освоение пути продолжалось и после революции 1917 года. Осуществлены экспедиции, которые подготовили возможность развития СМП как главной транспортной магистрали Северного региона и созданы первые порты северного морского пути.

Целью открытия Северного морского пути для зарубежных стран первоначально было нахождение более короткого пути на Восток. Первое

путешествие иностранцев с зимовкой у Чукотского полуострова совершила экспедиция под руководством А.Норденшельда на шхуне «Вега» в 1878-79 гг.

Освоение СМП с научной целью осуществлялось в основном русскими: ледокол «Ермак» под руководством С.Макарова; шхуна «Заря» Э.Толля; шхуна «Святая Анна» под командованием Г.Брусилова; шхуна «Святой Фока» под управлением Г.Седова; корабль «Геркулес» В.Русанова; ледоколы «Вайгач» и «Таймыр» под руководством Б.Вилькицкого и др.

Среди иностранных исследований Северного морского пути можно отметить путешествие американской шхуны «Жаннетта» под командованием Де-Лонга, норвежской экспедиции на судне «Фрам» под руководством Ф.Нансена. Норвежский корабль «Мод» под началом А.Амундсена прошел полностью весь северный морской путь с зимовками у побережий Чукотки и Таймыра.

Новый этап развития Северного морского пути начался после 1917 года. В те времена Советское государство уделяло ему большое внимание. В 30-е годы прошлого века освоение СМП, вместе с созданием ледоколов, обошлись государству в миллиарды рублей. За десять лет были созданы порты: Певек, Игарка, Диксон, Провидения и т.д. Отправлялись гидрографические экспедиции для изучения особенностей пути в Арктических льдах и пр. Составлялись навигационные карты.

В 1970 году была создана Администрация СМП при Министерстве морского флота. Задачи, стоявшие перед ней, было создание структуры арктического судоходства, обеспечение безопасности и экологический надзор. Также, для развития Северного морского пути государственный надзор за его рациональным использованием предполагался в качестве обязательного.

Вся система, которая создавалась в 90-е годы, была разрушена. С 1999 года стал активно расти интерес к Севморпути зарубежными странами. В настоящий момент Россия со своей стороны ведет активные действия по

становлению инфраструктуры и дальнейшему освоению Арктического региона [4].

### 1.3 Моря Северного морского пути

#### 1.3.1 Карское море



Рисунок 1.2 — Акватория Карского моря

*Географическое положение.* Карское море относится к окраинным морям. Море лежит на материковой отмели и широко открыто к Северному Ледовитому океану. Площадь составляет 883тыс. км<sup>2</sup>, средняя глубина-111м, наибольшая глубина 600м. Границы моря на западе - от м.Кользат (арх. Земля Франца-Иосифа) до м.Желания (арх. Новая Земля), далее по восточным берегам архипелага, по западной границе пролива Карские Ворота от м. Кусов Нос (арх. Новая Земля) до м. Рогатый (о. Вайгач), далее по восточному берегу острова, по западной границе пролива Югорский Шар к материку. Восточная граница моря - по западному берегу островов архипелага Северная Земля и восточным границам проливов Красной Армии, Шокальского и Вилькицкого. Северная граница - от м.Кользат (арх. Земля Франца-Иосифа) до м.Арктический на о.Комсомолец (арх. Северная Земля). Южная граница – материковый берег. Географические координаты Карского моря-81°б' 66°0' с.ш. и 55°2' 104°1' в.д. Карское море мелководное, дно неровное.

*Климат.* Характеризуется полярным морским климатом, Атлантический океан смягчает суровый климат, но барьером на пути теплых атлантических

вод и воздуха служит Новая Земля. Во все сезоны года, в разных районах, климатические показатели сильно отличаются из-за большой протяженности моря с юго-запада на северо-восток. В осенне-зимнее время усиливается Полярный максимум, потому что формируется Сибирский антициклон, начинает нарастать действие ложбины Ирландского минимума. Такая барическая ситуация дает повод для преобладания в большей части моря южных, юго-восточных, юго-западных ветров. Южные ветра зимой приносят очень холодный континентальный воздух. Средняя температура за месяц на м. Желания — минус 20°C, а в море температура воздуха может понижаться до -50°C.

Летом преобладают ветра северных румбов из-за формирования области повышенного давления. Лето холодное и короткое с большим количеством осадков в виде дождя.

*Речной сток.* Из общего стока сибирских рек в моря Арктики на Карское море приходится до 55%. Тепло, принесенное реками, повышает температуру поверхностных вод в приустьевых участках. Это притормаживает льдообразование осенью и помогает взлому припая весной.

*Ледовый режим.* Холодный, высокоширотный климат способствует полному замерзанию Карского моря зимой и, дает возможность существования льда в нем круглый год. В северных районах моря лед начинает образовываться в сентябре, а в южной части льдообразование начинается с октября. До мая море покрыто разного возраста и вида, льдом. Припай занимает прибрежную зону, в открытом море преобладают дрейфующие льды. Превалирует вынос дрейфа, он относит льды на север. К концу июля ото льда отчищается половина юго-западной части моря, на северо-востоке таяние происходит медленнее. К концу периода таяния практически половина моря остается занятой остаточными льдами. Интенсивнее море освобождается ото льда в июле-августе [5].

### 1.3.2 Море Лаптевых



Рисунок 1.3 — Акватория моря Лаптевых

*Географическое положение.* Море Лаптевых, в северной своей части, свободно сообщается с океаном, поэтому его относят к типу материковых окраинных морей.

Западная граница проходит по восточным берегам островов арх. Северная Земля от м. Арктический (о. Комсомолец), далее через пр. Красной Армии по восточному берегу о. Октябрьской Революции до м. Анучина, через пр. Шокальского до м. Песчаный на о. Большевик, и по его восточному берегу до м. Вайгач, затем по восточной границе пр. Вилькицкого и далее по материковому берегу до вершины Хатангского залива.

Северная граница моря проходит от м. Арктический до точки пересечения меридиана северной оконечности о. Котельный ( $139^\circ$  в.д.) с условным краем материковой отмели ( $79^\circ$  с.ш.,  $139^\circ$  в.д.)

Восточная граница от указанной выше точки ( $79^\circ$  с.ш.,  $139^\circ$  в.д.) к западному берегу о. Котельный, далее по западной границе пролива Санникова, огибает западные берега островов Большой и Малый Ляховские, и далее идет по западной границе пролива Дмитрия Лаптева.

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

Среднее значение глубины составляет 533м, самое глубокое место- 3385м, площадь моря-662 тыс. км<sup>2</sup>. Дно моря Лаптевых похоже на равнину, к северу круто обрывается. Море целиком занимает шельф, немного материкового склона и часть ложа океана. Большая часть моря (53%) мелководна, глубина составляет менее 50 м. Северная часть глубже, чем южная. Южная часть море не превышает глубины 25 м.

*Климат.* Так, как море Лаптевых удалено от Атлантического и Тихого океанов, и близко расположенные материк и льды Арктики, его климат можно отнести к континентальному с хорошо выраженными морскими чертами.

В осенне-зимнее время море находится под влиянием повышенного атмосферного давления, преобладают ветры южного и юго-западного направления, они неустойчивы и могут усилиться до штормовых. К концу зимы скорость ветра уменьшается и наблюдается штиль.

В теплый период часто дуют северные ветры. Летом господствуют циклоны. В это время постоянно пасмурная и дождливая погода. В конце августа начинает формироваться Сибирский максимум, что означает наступление осени.

*Ледовый режим.* В период с октября по май море Лаптевых покрыто льдом, разным по возрасту и толщине. Ледообразование происходит по всей площади моря одновременно. Начало нарастание льда-конец сентября начало октября. Припай занимает примерно 30% от всей площади моря. Севернее зоны припая находятся дрейфующие льды. Таяние льда начинается в июне-июле, а уже к концу августа большая часть моря освобождается ото льда. Из-за влияния течений и ветров летом, кромка льда меняет свое положение. Восточная часть менее ледовита, чем западная. С севера часто опускается Таймырский ледовый массив, который сохраняется до нового ледообразования[5].

### 1.3.3 Восточно-Сибирское море



Рисунок 1.4 — Акватория Восточно-Сибирского моря

*Географическое положение.* Восточно-Сибирское море по гидрологическим условиям и географическому положению относится к материковым окраинным морям. Площадь - 913 тыс. км<sup>2</sup>, объем - 49 тыс. км<sup>3</sup>, средняя глубина - 54 м, наибольшая глубина - 915 м.

Западная граница проходит от точки пересечения меридиана северной оконечности о. Котельный с краем материковой отмели (79° с.ш., 139° в.д.) до северной оконечности этого острова (м. Анисий), затем по его западному берегу и далее следует вдоль восточной границы моря Лаптевых.

Северная граница проходит по краю материковой отмели от точки с координатами 79° с.ш., 139° в.д. до точки с координатами 76° с.ш., 180° в.д.

Восточная граница – от точки с координатами 76° с.ш., 180° в.д. по меридиану 180° до о. Врангеля, затем по его северо-западному берегу до м. Блоссом и далее до м. Якан на материке.

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

Дно моря представляет собой равнину, не имеет впадин и возвышенностей. Самое глубокое место находится в северо-восточной части моря, но не превышает 100м, преобладающие глубины-20-25 м.

*Климат.* Климат Восточно-Сибирского моря характеризуется как полярный морской, со значительным влиянием континента, потому что море

находится в зоне соприкосновения атмосферного воздействия Тихого и Атлантического океанов. В западную часть моря проникают атлантические циклоны, а в восточную – тихоокеанские.

Зимой ясная погода, которая иногда нарушается проходящими циклонами. Ветры в это время года дуют южные и юго-западные. В западной части моря атлантический циклон является условием усиления ветра и небольшого потепления. В юго-восточной части моря тихоокеанский циклон несет с собой холодный воздух с континента, который увеличивает скорость ветра, облачность и вызывает метели. Также этот циклон связан с образованием местного ветра - фена. Это штормовой ветер, который несет с собой некоторое повышение температуры и уменьшает влажность воздуха.

В теплое время года ветер набирает силу. Западная часть Восточно-Сибирского моря становится самым бурным участком на трассе СМП. Значительно спокойнее в юго-восточном районе моря. Такие шторма связаны с фенами. Низкую температуру несут северные и северо-восточные ветры. Средняя температура летом составляет 1-2°C. Погода в основном пасмурная, с морозящим дождем и иногда мокрым снегом.

*Ледовый режим.* Восточно-Сибирское море-самое ледовитое море. Оно полностью покрыто льдом с октября-ноября, до июня-июля. Особенность льдов Восточно-Сибирского моря-это хорошо развитый припай. За припаем располагаются, однолетние и двухлетние дрейфующие льды, их толщина достигает до 2-3 м. В самой северной части моря встречается многолетний арктический лед. Господствующие зимой южные ветры относят льды от северной кромки припая, из-за этого появляется пространство чистой воды и молодых льдов, которые образуют стационарную полынь. На севере, от полосы Новосибирских островов всегда присутствует лед. Обширную часть на востоке моря занимает Айонский ледяной массив, который состоит из тяжелых многолетних льдов. Он усложняет ледовую обстановку в Восточно-Сибирском море [5].

### 1.3.4 Чукотское море



Рисунок 1.4 — Акватория Чукотского моря

*Географическое положение.* По своему типу Чукотское море относится к материковым окраинным морям. Площадь моря-595 тыс. км<sup>2</sup>, объём-42 тыс. км<sup>3</sup>, наибольшая глубина-1256м, средняя глубина-71 м.

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

Северная граница проходит от точки с координатами 72° с.ш., 156° з.д. до м. Барроу на Аляске.

Восточная граница проходит по материковому берегу Аляски до южного входного мыса бухты Шишмарева (п-ов. Сьюард).

Южная граница Чукотского моря проходит по северной границе Берингова пролива от южного входного мыса бухты Шишмарева (п-ов Сьюард) до м. Уникан (Чукотский полуостров) и далее по материковому берегу до м. Якан. К Чукотскому морю относится пролив Лонга, западная граница которого проходит от м. Блоссом до м. Якан. Восточная граница пролива идет от м. Пиллар (о. Врангеля) до м. Шмидта.

Дно моря ровное, понижение дна в центре и поднятие по краям, делает море похожим на чашу.

*Климат.* Над морем, в холодное время года, дуют ветра неустойчивого направления. Осенью температура воздуха быстро понижается и уже к

октябрю достигает примерно  $-8^{\circ}\text{C}$ , а в ноябре преобладают температуры зимней величины. Ветры дуют северо-западные. В феврале ветры с севера и северо-востока дуют в северной части моря. В южной части моря дуют северные и северо-западные ветра. Во второй половине зимы дуют южные ветра. Средняя температура воздуха во второй половине зимы  $-26^{\circ}\text{C}$ . Зимой на Чукотском море пасмурная погода с порывистыми ветрами, бывает заток теплого воздуха с Берингова моря.

В весенний период ветры меняют свое направление на южное.

В летнее время в южной части моря дуют южные и юго-восточные ветра, а в северной части наоборот дуют северные и северо-западные ветра. Лето короткое, холодное и пасмурное, иногда бывает с дождем.

*Ледовый режим.* На Чукотском море с ноября по июнь льды покрывают море полностью, от неподвижных у берегов и плавучих в дали от него. Припай здесь не очень развит, он окаймляет только узкую прибрежную зону, за ним дрейфующие льды. В северной части моря встречаются тяжелые многолетние льды. Во время затяжных ветров, которые относят дрейфующие льды от побережья Аляски между припаем и отнесенным льдом формируется стационарная Аляскинская полынья. Летом кромка льда отступает на север, а в конце сентября начинает нарастать новый молодой лед, который к зиме покрывает все море [5].

#### 1.4 Трассы Северного морского пути

На пути прохождения СМП расположено около 50 терминалов, порт-пунктов, портов. Они все открыты для судов разных стран. Существует уведомительный и разрешительный порядок прохода. Разрешительный проход действует в том случае, когда нужен учет проводимого груза, который может представлять собой опасность для судна или страны. Для

передвижения по трассам Севморпути нужны соответствующие технические характеристики, опытный капитан, у которого была практика прохождения ледовой акватории, для нашего государства должна быть гарантия выплаченной компенсации при загрязнении окружающей среды.

Все суда, которые двигаются по трассам СМП, следуют указаниям штаба морских арктических операций запада и востока Арктики. Штаб снабжает информацией об актуальной обстановке на трассе, определяет время движения по участкам, подбирает варианты прохождения по участкам, обеспечивает ледокольное сопровождение и авиационную ледовую разведку.

С октября по май вдоль побережья Арктических морей проходят транзитные пути СМП, исключая Карские ворота, пролив Лонга и Берингов пролив. Наиболее благоприятны для сквозного передвижения, на западном участке, СМП будет в июне-июле, если идти через пролив Югорский шар и Карские ворота. В августе можно использовать любой маршрут, с сентября по октябрь надо обходить через мыс Желания.

На восточном участке, в зависимости от сезона, трассы моря Лаптевых и Новосибирских островов, могут меняться. Удачным будет прохождение через пролив Вилькицкого[6].

### 1.5 Характеристика льда

Каждую навигацию суда выполняют грузоперевозки, которые возможны только при достоверной и качественной информации о характеристике и распределении морских льдов на пути движения. Полная информация характеристик и распределение ледяного покрова составляет более десяти показателей, каждая из которых включает большое число видов, градаций, баллов [7].

Эти характеристики сгруппированы в категории:

- толщина льда;
- сплоченность;
- стадии таяния — разрушенность льда;
- формы льда — размеры льдин;
- динамические процессы;
- рельеф поверхности — торосистость льдин;
- льды материкового происхождения — айсберги.

Основные навигационные характеристики: общая сплоченность, форма льда, возраст льда.

*Сплоченность.* Сплоченность-степень покрытия акватории льдом, количественно оценивается как отношение площади льдин в районе, где они распределены примерно равномерно, к общей площади этого района. Выражается в десятых долях. Лед в зависимости от его сплоченности классифицируется как редкий при сплоченности 1-3/10, разряженный-4-6/10, сплоченный—8/10, очень сплоченный — 9-10/10, смерзшийся — 10/10. Разновидностью сплошного льда является припай — лёд, который образуется вдоль побережья и остается относительно него неподвижным.

*Возраст льда.* С помощью возраста льда определяют его толщину. Различают начальные виды льда(ледяные иглы, ледяное сало, снежура, шуга, блинчатый лед, нилас и склянка)-толщина 3-10 см; молодой лед — толщина 10-30 см; однолетний лед — толщина 30-200 см; старый лед — (двухлетний , многолетний)-более 250 см.

*Толщина и сплоченность льда.* Это основные характеристики с помощью которых выбирают самый оптимальный курс судна: сначала определяют район с наименьшей сплоченностью, затем в этом районе выбирают участок с минимальной толщиной льда. При одинаковой сплоченности и возрасте льда движение судна зависит от формы ледяных образований.

*Ледяные поля.* Кусок морского льда более 20 м в поперечном сечении называется ледяным полем. В зависимости от горизонтальных размеров

ледяные поля разделяются на гигантские (более 10 км в поперечнике), обширные (от 2 до 10 км), большие (от 500 до 2000 м), обломки ледяных полей (100-500 м), крупнобитый лед(20-100м).

*Формы льда.* мелкобитый лед (менее 20 м), ледяная каша-скопление льда, состоящее из обломков размер которых составляет не более 2-х метров, айсберги-отколовшиеся от ледника каски льда различной формы, выступающие над поверхностью воды более чем на пять метров. Если по курсу судна наблюдается лед с одинаковой сплоченностью и толщиной , то предпочтение отдают участкам пути с повышенной раздробленностью льда.

*Торосистость.* Оценивают торосистость так же как и сплоченность. Поперечное сечение тороса представляет собой две равнобедренные трапеции , стоящие одна над другой. Верхняя часть тороса, видимая, возвышающаяся над поверхностью льда называется парусом, подводная называется килем тороса. Торосы могут стать огромной проблемой для самого мощного ледокола. Встречаются торосы различных возрастов (свежие и старые), и видов (сглаженные, сильно сглаженные, монолитные), пояса торосов или гряд торосов примыкающая одна к другой.

*Заснеженность.* Эта характеристика оценивается по двум критериям: толщиной снега и относительной площадью покрытого снегом льда. Влияние снежного покрова на движение ледокола проявляется тем сильнее, чем больше толщина льда и меньше скорость его движения.

*Сжатие льда.* происходит деформация льда, льдины с силой давят на корпус судна затрудняя или делая невозможным его проходимость. Сжатый лед — это большая опасность для навигации.

*Разрушенность льда.* Лед при таяние начинает разрушаться, разрушенность льда оценивается визуально, по виду льда. Когда на льду появляется талая вода-скорость ледокола увеличивается на 15-20%. когда у льда высокая степень разрушенности, ледокол , даже не самый мощный, идет как по чистой воде. Скорость судна зависит не только от ледовой обстановки,

но и от видимости на трассе. При ограниченной видимости скорость судна снижается на 15% [7].

## 1.6 Ледяные массивы

Лёд сплоченностью 7-10/10 дает наибольшее сопротивление движению судов. Географическое положение границы сплоченного льда характеризуется межгодовой изменчивостью. В разгар навигации, в неблагоприятные годы, сплоченный лед может блокировать движение судоходства на том или ином участке трассы. Из многолетних исследований установлено, что в определенных арктических районах формируется скопление льдов сплоченностью 7-10/10, такое скопление льдов называли ледяными массивами [7, стр 18-28].

Ледяные массивы делятся на: отроговые (отроги океанского массива арктического бассейна) и припайные (местного происхождения). Существует 9 ледяных массивов:

1. Новоземельский (НЗМ);
2. Североземельский (СЗМ);
3. Карский Северный (КСМ);
4. Таймырский(ТМ);
5. Янский(ЯМ);
6. Новосибирский(НМ);
7. Айонский(АМ);
8. Врангельский(ВМ);
9. Чукотский Северный (ЧСМ).

Новоземельский: состоит в основном из однолетних льдов, в первой декаде июня занимает больше 50% площади района. В неблагоприятные года вся юго-западная часть Карского моря во льдах до конца июля, в конце августа-начале сентября ледяной массив исчезает.

Североземельский: массив припайного происхождения, находится

массив в районе о.Диксон -пролив Вилькицкого, он блокирует его западные проходы. В июле занимает практически всю площадь района, около 80%. Уменьшаться площадь Североземельского массива в результате разрушения и таяния льда, частичного выноса льда через пролив Вилькицкого в море Лаптевых.

Карский северный: это отрог океанского ледяного массива, состоит из однолетних, двухлетних льдов и так же многолетних. Массив разрушается медленно в отличии от других массивов Карского моря. В некоторые неблагоприятные года Новоземельский и Карский северный массивы в течении всей навигации составляют единое целое.

Таймырский: самый большой по площади массив, отрогового происхождения, в северной части массив состоит из однолетних, двухлетних и многолетних льдов, в южной части состоит из однолетних. В западном районе моря Лаптевых ледовые условия плавания зависят от положения и площади Таймырского массива.

На начале навигации наибольшая протяженность сплоченного льда наблюдается между устьями рек Колыма и Лена. Именно этим обстоятельством определяется тактика организации морских операций в период летний навигации. Перевозка грузов начинает осуществляться на фланговых участках СМП, потом, по мере разрушения льда в Новосибирском районе операции перемещаются на центральные участки пути. К концу лета - начала осени условия плавания становятся практически везде одинаковыми. Но такая обстановка на трассах не всегда такая, бывают легкие, средние и тяжелые условия на различных участках.

Для каждого из типов распределения льдов существуют стандартные(традиционные) варианты трасс плавания, их может быть несколько. В реальных условиях конкретных навигаций пути движения судов могут меняться и отличаться от стандартных. Такие варианты называются легкими или оптимальными. Путь плавания в этом случае прокладывается по

зонам тонких и наименее сплоченных льдов, это часто приводит к удлинению пути и участков лежащих вне стандартных трасс [7].

### 1.7 Развитие транспортной системы Арктики

Прохождение СПМ на простом судне это задача не из легких. Нормальное движение судов по трассам СПМ стало возможным после строительства ледокольного флота и специализированных транспортных судов с ледовыми усилениями корпуса [7, стр. 29-31]. В 20-е 30-е года в нашей стране было всего три ледокола с малой мощностью 5150 кВт каждый. Это знаменитые ледоколы: «Красин», «Ермак», «Ленин», их построили еще в дореволюционное время. Был ледокол, построенный в Нидерландах - «Сибиряков», мощность которого составляла 6180 кВт, и ледорез «Литке», мощностью 5150 кВт. Самый первый отечественный ледокол был введен в эксплуатацию в 1938 году — ледокол «Сибирь». С 1939 года в работу вступили еще три ледокола типа «Сибирь»: «адмирал Лазарев», «Микоян», «Адмирал Нахимов». Эти ледоколы были с паровыми энергетическими установками и мощностью 7350 кВт.

После войны ледоколы «Сибиряков», «Сибирь» и «Красин» были модернизированы, они стали работать на жидком топливе. Благодаря модернизации ледоколов ледопроездимость стала выше.

В 50-х годах на смену паровым маломощным ледоколам пришли ледоколы с дизель-электрическими установками. В 1954-1956 гг. в Финляндии, по заказу были построены три ледокола с мощностью энергетической установки 8826 кВт. Чуть позже были построены еще пять ледоколов в мощностью 19123 кВт: «Москва»(1960г.), «Ленинград»(1961г.), «Киев»(1965г.) «Мурманск»(1968г.), «Владивосток»(1969г.). Эти ледоколы отлично справлялись со своей работой в арктических морях при проводке судов.

После построек ледоколов с дизель-электрическими установками, из эксплуатации стали снимать ледоколы послевоенной и дореволюционной

построек.

На этом совершенствование ледокольного флота не остановилось. В нашей стране велись работы по постройке ледокола с ядерной энергетической установкой мощностью 32360 кВт. Это атомоход «Ленин», первый в мире ледокол с такой установкой был построен в 1959 году, а в 1960 уже участвовал в арктической навигации. Строительство Атомохода имело большое значение для нашей страны, оно показывало, что Советский Союз не отстает в научно-техническом и экономическом развитии.

Можно сказать смело, что к началу 90-х годов XX века в России была создана Арктическая морская транспортная система, имеющая в своем составе мощные атомные ледоколы, которые обеспечивают продленные сроки навигации, а в некоторых районах, таких как западная Арктика, обеспечивают круглогодичное судоходство и повышенные надежности перевозок [7].

## 1.8 Экономические перспективы СМП

Экономическая роль Севморпути, прежде всего, значима для жизнедеятельности населения северного региона. Снабжать некоторые районы достаточно трудно, доставлять продовольствие приходится по воздуху, что малоэффективно, либо на выручку приходит морской флот [8].

СМП связывает северные реки, является единой транспортной системой, которая обедняет удаленные объекты в единую инфраструктуру.

В связи с нашествием глобальным потеплением экономические перспективы СМП увеличиваются. Из-за потепления, в летний период, Арктика освободится ото льда полностью, и станет беспрепятственной для прохождения морских судов, уйдет необходимость использования специализированных судов, таких как ледоколы, сам период навигации увеличится.

Также, глобальное потепление увеличит и облегчит добычу полезных ископаемых, залежи которых находятся на шельфе Арктики.

Но это только перспективы, которые могут открыться. Нынешняя экономика СМП хромает. Главная транспортная артерия севера требует больших вложений. В реконструкции нуждаются головные порты, требуется замена ледокольного флота в связи с выводом ее из эксплуатации по окончании срока службы. Многолетнее отсутствие финансирования поставило под угрозу исчезновения навигационно-гидрографического обеспечения и системы радиосвязи.

Северному морскому пути требуется государственное и зарубежное финансирование для дальнейшего развития [8].

## 2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Исходные данные

В качестве исходных данных для выполнения исследования из интернет-ресурсов [/NOAA\\_SST/OISST/monthly\\_ice/](#) и [SOURCES/.NOAA/.NCEP-DOE/.Reanalysis-2/.Monthly/.flx/.flx/](#) с дискретностью  $1 \times 1$  градус, были выбраны среднемесячные, значения в период с декабря 1981 г. по ноябрь 2015 г. по 25 точкам, координаты которых представлены в таблице 2.1.

Таблица 1 — Географические координаты точек

	точка1	точка2	точка3	точка4	точка5	точка6	точка7	точка8	точка9	точка10
долгота	57.5E	63.5E	70.5E	76.5E	82.5E	87.5E	92.5E	98.5E	103.5E	110.5E
широта	70,6N	72,5N	73,9N	76,8N	74,6N	75,8N	77,02N	77,5N	77,9N	77,8N
	точка11	точка12	точка13	точка14	точка15	точка16	точка17	точка18	точка19	точка20
долгота	116.5E	121.5E	126.5E	133.5E	140.5E	147.5E	152.5E	156.5E	168.5E	175.5E
широта	77,2N	76,4N	75,5N	74,8N	74,4N	74,3N	73,6N	72,5N	70,3N	70,9N
	точка21	точка22	точка23	точка24	точка25					
долгота	179.5W	175.04W	169.5W	68,72E	75.5E					
широта	61,1N	67,8N	166,1N	77,2N	76,07N					

Были выбраны следующие характеристики:

- ледовитость, %;
- температура воздуха, °C;
- зональная составляющая ветра, м/с;
- меридиональная составляющая ветра, м/с.

### 2.2 Методы статистических исследований

Для исследования особенностей временной изменчивости в работе были использованы следующие методы анализа временных рядов.

### 2.2.1 Среднее арифметическое и стандартное отклонение.

Среднее арифметическое значение статистического ряда (X) характеризует точку ее равновесия при различных колебаниях. Рассчитывается по формуле:

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

Стандартное (или среднее квадратическое) отклонение ( $\sigma$ ) характеризуют среднее рассеяние значений ряда от среднего арифметического значения. Стандартное отклонение связано с дисперсией (D).

Рассчитываются по формулам :

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \quad \sigma = \sqrt{D} \quad (2.2)$$

### 2.2.2 Анализ временного тренда

Тренд представляет собой некоторую медленно меняющуюся составляющую процесса, период которой превышает длину исходной реализации, выражаться линейным уравнением:

$$T(t) = a_0 + a_1 t. \quad (2.3)$$

Статистическая значимость тренда определяется значимостью его коэффициента  $a_1$ . Коэффициент тренда считается значимым, если отношение

$a/\sigma_a$  превышает критерий Стьюдента при определенных уровне значимости (5%) и степеней свободы ( $\nu=N-1$ ).

Так же выбирается коэффициент детерминации  $R^2$  который показывает долю дисперсии исходного ряда, и рассчитывается как квадрат коэффициента корреляции. Проверка значимости коэффициента проводится так же, как и в корреляционном анализе который приведен ниже.

### 2.2.3 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:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2i} - \bar{x}_2)]}{N\sigma_1\sigma_2} \quad (2.4)$$

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:

$$t^* = \frac{R}{\sigma_R}, \quad \text{где } \sigma_R = \frac{1 - R^2}{\sqrt{N - 1}} \quad (2.5)$$

$\sigma_R$  - 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.

### 3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВИТОСТИ И ДРУГИХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА СЕВЕРНОМ МОРСКОМ ПУТИ

#### 3.1 Изменчивость ледовитости на Северном морском пути

Для 25 точек, которые расположены на одной из оптимальных трасс прохождения СМП, были рассчитаны средние многолетние значения ледовитости и стандартное отклонение её внутригодового хода за период с декабря 1981 г. по ноябрь 2015 года.

Рассмотрим карту (рисунок 3.1), в которой представлены средние значения ледовитости в процентах, подписанное на карте выше точек синим цветом и стандартное отклонение, подписанное красным цветом под кружком.

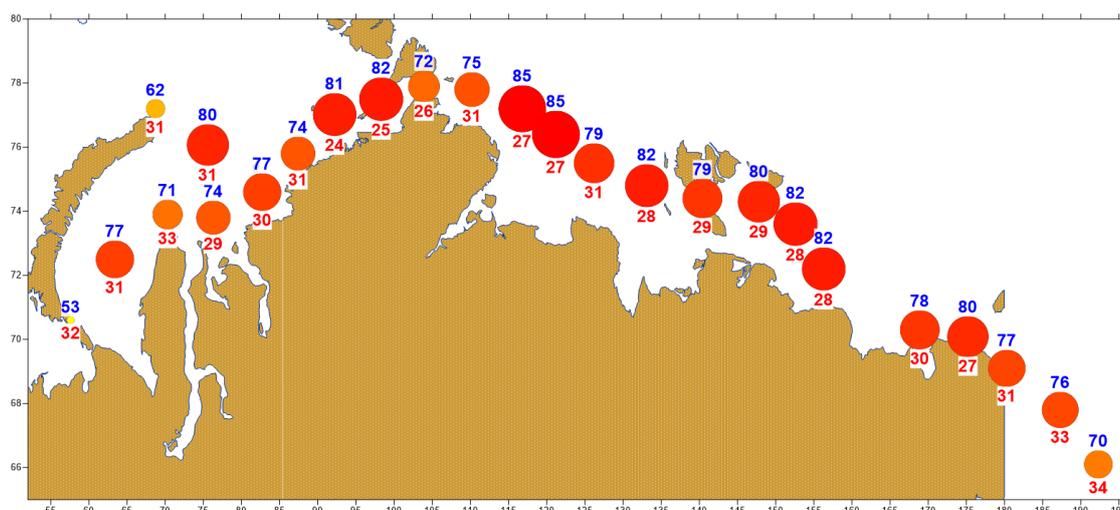


Рисунок 3.1 - Средняя многолетняя ледовитость за период с 1981 по 2015 гг., % (сверху) и её стандартное отклонение (снизу).

Величина и интенсивность цвета пропорциональны средней ледовитости.

На карте (рисунок 3.1) видно, что в целом площадь арктических морей занята льдом от 53 до 85%. Меньше всего льда наблюдается в трех районах СМП: пролив Карские ворота, точка у мыса Желания и в Беринговом проливе,

площадь, занятая в этих районах льдом, составляет 53%, 62%, 70% соответственно. Также видно, что больше льда находится в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море, ледовитость в этих морях варьирует от 75 до 85%. Стандартное отклонение, которое показывает изменчивость ледовитости, составляет 24-34%. Это говорит нам о том, что средние многолетние колебания ледовитости обладают большой внутригодовой изменчивостью.

В связи с тем, что ледовитость испытывает значительную внутригодовую изменчивость, процессы которые проходят со льдом летом и зимой принципиально различны, нужно разделить среднемесячные ряды на сезонную составляющую: зимнюю и летнюю.

Зимняя сезонная составляющая находится в интервале с ноября по апрель. Апрель был выбран, потому что в Арктических морях в апреле наблюдается максимальное количество льда, это самый экстремальный месяц для ледовитости арктических морей, его исключить из зимней составляющей никак нельзя.

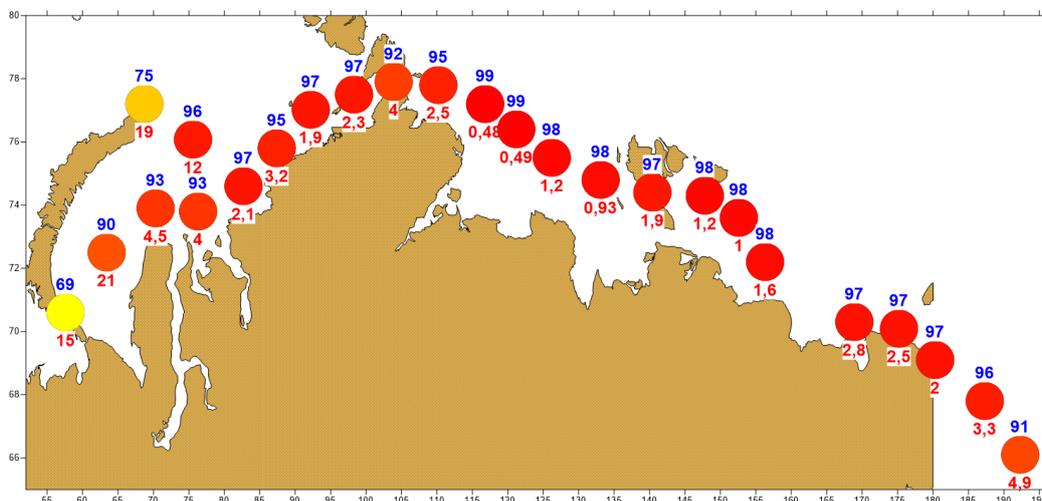


Рисунок 3.2 - Средняя зимняя ледовитость за период с 1981 по 2015 гг., % (сверху) и её стандартное отклонение (снизу).

Величина и интенсивность цвета пропорциональны средней ледовитости.

Если рассмотреть среднюю ледовитость за зимний период с 1981 по 2015 года, представленную на рисунке 3.2, видно, что зимой акватория арктических морей плотно занята льдами от 90 до 99%, то есть моря Арктики покрыты льдами полностью.

Исключение составляют две точки Карского моря – мыс Желания и пролив Карские ворота, где площадь, занимаемая льдом, составляет соответственно 75, и 69%, практически на  $\frac{1}{4}$  меньше чем в других точках исследуемого района.

Карское море и Берингов пролив – районы с ледовитостью от 90 до 97%. Это меньше чем в Восточно-Сибирском море и в море Лаптевых, там ледовитость составляет 97 - 99%.

Средняя многолетняя изменчивость за зимний период в арктических морях, указанная на рисунке 3.2 красным цветом под кружком, составляет от 0,5 до 21%.

Средняя изменчивость в двух районах Карского моря очень высокая. Это северная часть Карского моря и Мыс Желания и 2 точки юго-западной части Карского моря. Они составляют 12, 19, 15, 21%.

На остальных же участках трассы изменения ледовитости не такие значительные, они не превышают 5%.

Значит, зимой на трассе Северного морского пути, исключая Карское море, ледовая обстановка остается практически неизменной.

Можно сделать предположение, что на ледовитость Карского моря влияет Новоизмайловская полынья, которая может являться очагом очищения акватории ото льда в зимний период.

Летняя составляющая для ледовитости была взята с мая по октябрь. На рисунке 3.3 представлена ледовая обстановка за многолетний период в летний сезон.

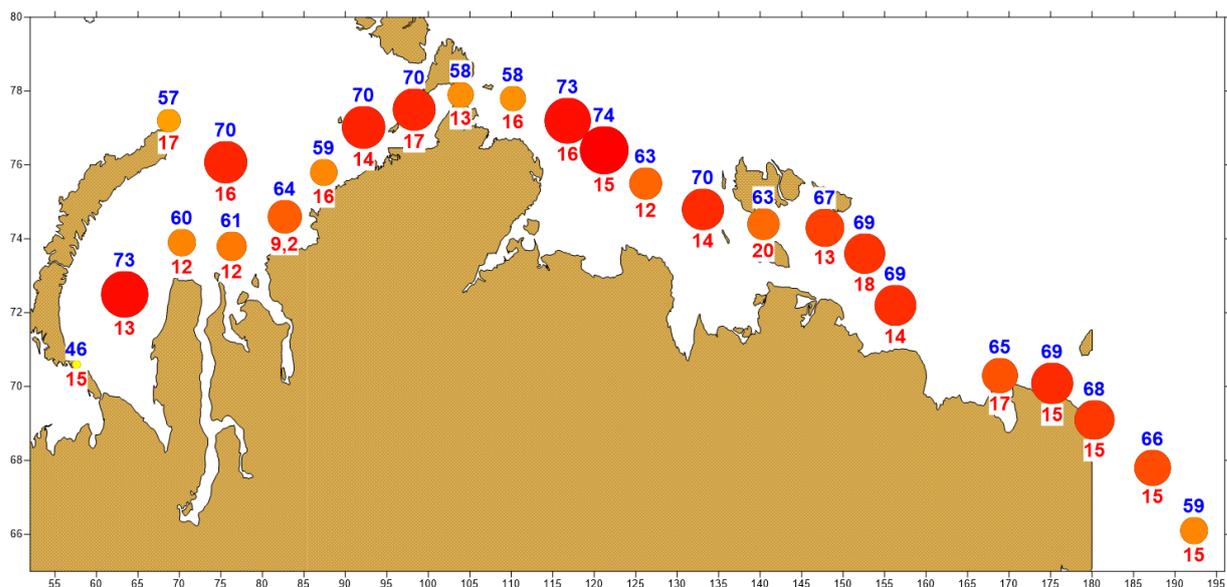


Рисунок 3.3 - Средняя летняя ледовитость за период с 1981 по 2015 гг., %  
(сверху) и её стандартное отклонение (снизу)

Величина и интенсивность цвета пропорциональны средней ледовитости.

Понятно, что летом количество льдов сокращается. Количество занимаемой льдами площади составляет 46-74%.

Менее ледовитые районы – это Карское море и Берингов пролив. Точки мыс Желания Карского моря и точка в проливе Карские Ворота, места, где лед занимает меньше 57% площади, а конкретно 46, среднее значение точки Берингова пролива равно 59%.

Максимальная ледовитость летом находится на участке трассы СМП в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море. Есть 2 точки в западной части моря Лаптевых где ледовитость составляет 73 и 74%, скорее всего, это можно объяснить опусканием с севера Таймырского ледового массива, который может сохраняться до нового льдообразования.

Внутренняя изменчивость ледовитости летом достаточно заметная, от 9 до 20%.

В проливе Санникова самый высокий процент внутригодовой изменчивости он равен 20%

В целом изменчивость ледовитости северных морей в летний период с сравнение со средним значением заметно.

Для исследования изменчивости ледовитости Арктических морей использовался анализ временного тренда, основными характеристиками которого принята величина тренда и коэффициент детерминации  $R^2$ . На рисунках величина тренда обозначена синим цветом над точками, коэффициент детерминации  $R^2$  обозначен красным цветом, находится под точками.

Приведенные ниже карты со значимыми коэффициентами тренда покажут, какая тенденция изменения ледовитости происходила за многолетний период.

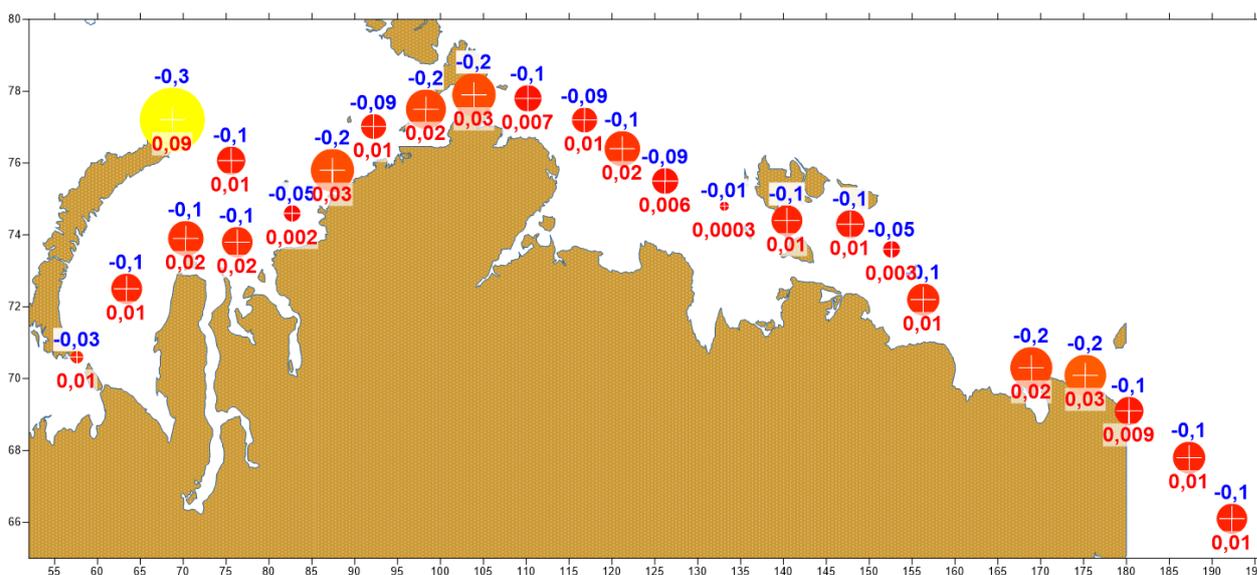


Рисунок 3.4 — Коэффициенты тренда многолетней среднемесячной изменчивости ледовитости (сверху) и коэффициент детерминации  $R^2$  (снизу) за период с 1981 по 2015 гг.

На рисунке 3.4 видно, что значимые коэффициенты тренда среднемесячной многолетней изменчивости везде со знаком минус, это говорит о том, что количество льда уменьшается. Максимальное уменьшение льда наблюдается у мыса Желания, оно составляет 0,3% в месяц. Также в

восточной части Карского моря, в проливе Вилькицкого и в восточной части Восточно-Сибирского моря коэффициент тренда равен -0,2% в месяц.

По оценке  $R^2$ , которая приведена под точками красным цветом, можно сказать, что при уровне значимости 0,05 практически все тренды получились значимыми. Таким образом, значимость трендов по среднемесячным характеристикам свидетельствует о том, что тренд значительный, и он хорошо выделяется на фоне внутрисезонной изменчивости.

Также были произведены расчеты коэффициентов тренда и коэффициента детерминации  $R^2$  для зимней сезонной составляющей. Для  $R^2$  был рассчитан уровень значимости, который составил 0,1. Для понимания происходящего с льдообразованием в зимний период, с учетом этого уровня значимости были нанесены на карту только значимые коэффициенты детерминации (рисунок 3.5).

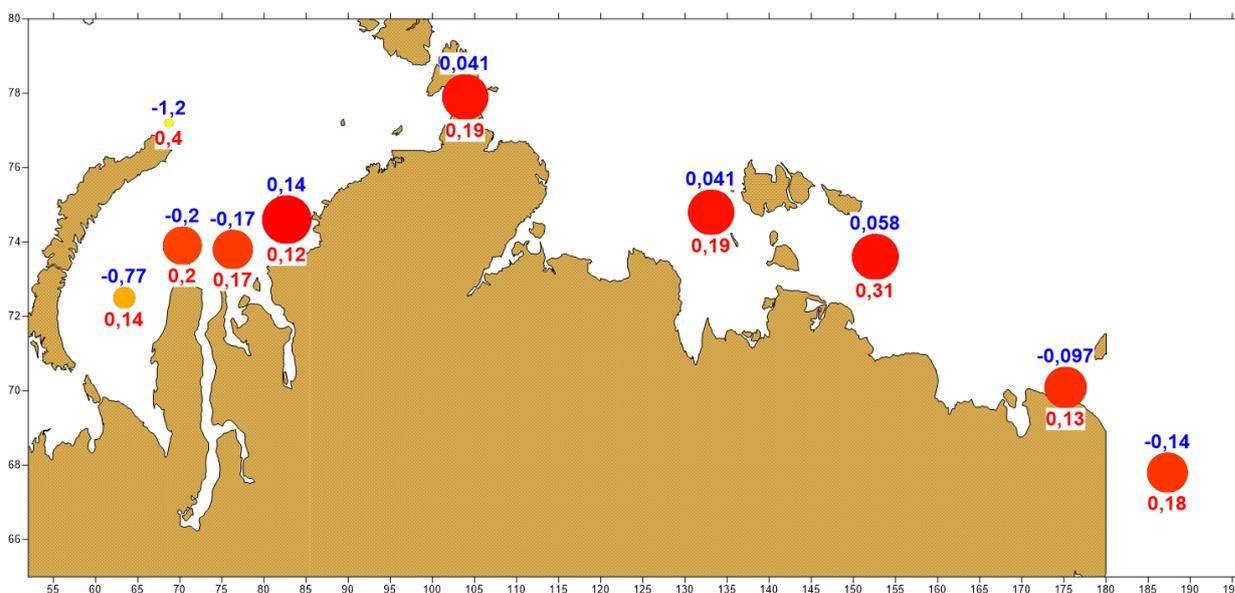


Рисунок 3.5 - Коэффициенты тренда (сверху), коэффициент детерминации  $R^2$  (снизу) для зимней сезонной изменчивости за период с 1981 по 2015 гг.

Тренды, которые представлены на рисунке 3.5, разные по знаку. Можно отметить, что уменьшение количества льда в зимний период наблюдается

только в западной части Карского моря и в восточной части Чукотского моря. Это максимально проявляется в динамичных районах, где, как уже видели на предыдущих картах (см. рисунок 3.1, 3.2 и 3.3), льда меньше: в прибрежной части Карского моря, у мыса Желания, в восточной части Восточно-Сибирского моря и в Беринговом проливе.

Но помимо уменьшения количества льда, также наблюдается и рост льда в прибрежной юго-восточной части Карского моря, в проливе Вилькицкого, северо-восточной части моря Лаптевых и в западной части Восточно-Сибирского моря. Максимальное увеличение количества льда (0,04, 0,06% в год).

На рисунке 3.5 видно, что у мыса Желания самый высокий коэффициент детерминации. Это говорит о том, что в этом районе идут значительные изменения в области льдообразования, а так как коэффициент тренда в этом районе с минусом, то понятно, что здесь происходит значительное уменьшение льда. В данном случае 40% межгодовой изменчивости приходится на тренд. Здесь же наблюдается самая большая величина тренда-1,2% в год.

Для летней сезонной составляющей на рисунке 3.6 приведены только значимые (с уровнем значимости 0,05) коэффициенты тренда и коэффициента детерминации  $R^2$ .

Летом значимых коэффициентов тренда оказалось значительно больше, они располагаются практически на всем СМП.

Все коэффициенты трендов со знаком минус, как уже говорилось, что этот знак означает уменьшение количества льда. Раз на рисунке 3.6 представлены только значимые коэффициенты, то можно сказать, что эти районы максимально освобождаются ото льда в летний период.

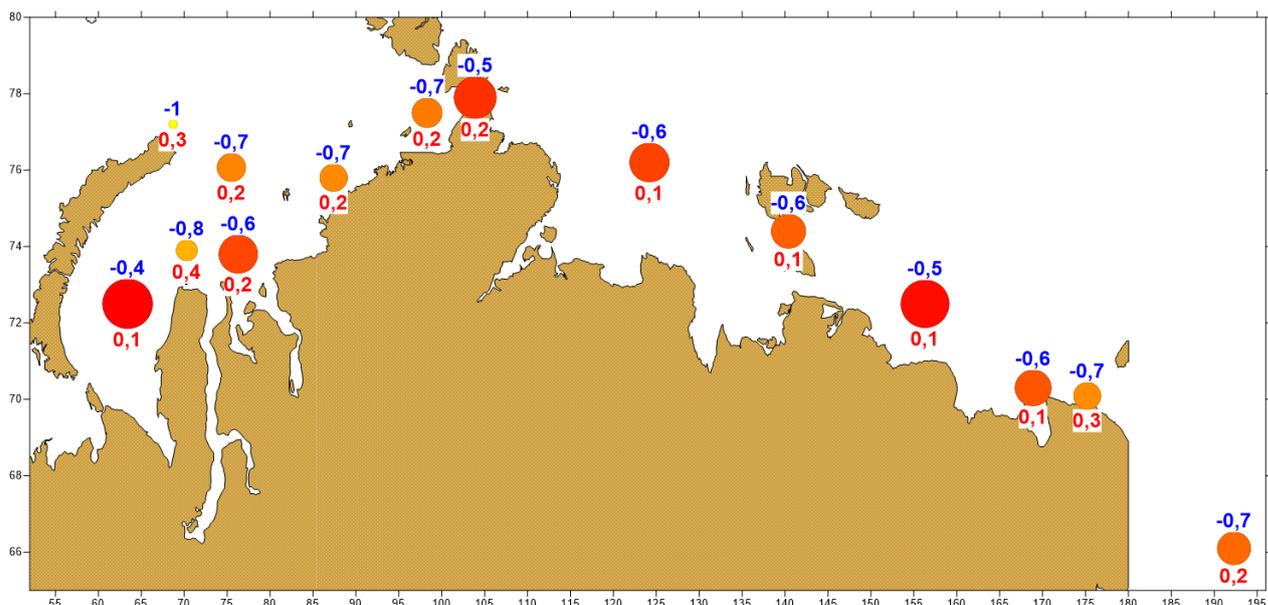


Рисунок 3.6 - Коэффициенты тренда (сверху), коэффициент детерминации  $R^2$  (снизу) для летней

сезонной изменчивости

за период с 1981 по 2015 гг.

Коэффициент детерминации  $R^2$  в Карском море и в восточной части Восточно-Сибирского моря составляет 0.3, то есть порядка 30% всей изменчивости занимает тренд, показывает нам, что в этом районе летом количество льда значительно сокращается. Это можно снова связать с Новоземельской полыньей, благодаря которой акватория отчищается ото льда быстро. В целом уменьшение количества льда составляет от 0,4 до 1% в год.

### 3.2 Изменчивость температуры воздуха

Для того чтобы понимать, почему количество льда уменьшается, была взята температура воздуха в период с декабря 1981 по ноябрь 2015 гг.

Так как температурный режим от сезона к сезону не постоянен, данные по температуре воздуха были разделены на сезонные составляющие так же, как и ледовитость.

На рисунке 3.7 представлена средняя зимняя температура воздуха (сверху, синим цветом) и ее стандартное отклонение (снизу, красным цветом).

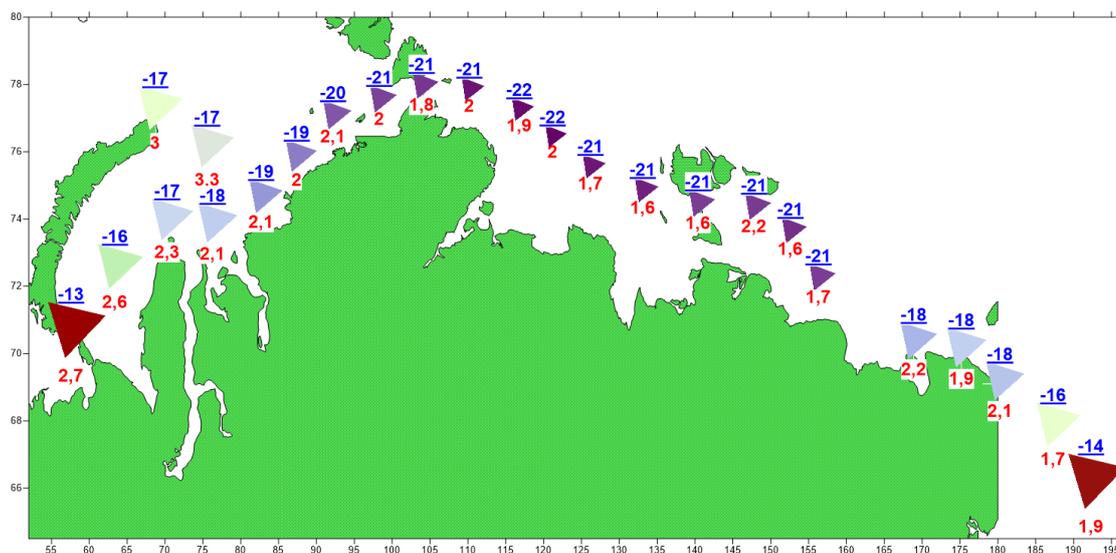


Рисунок 3.7 - Средняя зимняя за период 1981-2015 гг. температура воздуха, °С (сверху) и ее стандартное отклонение (снизу)

На карте (рисунок 3.7) хорошо видно что средняя зимняя температура везде сильно низкая, порядка  $-20$  °С.

Максимально теплые участки - это Карское море, пролив Карские ворота, мыс Желания, восточная часть Восточно-Сибирского моря и Берингов пролив. Температура в этих районах колеблется от  $-13$  до  $-18$  °С.

Самые холодные-море Лаптевых и западная часть Восточно-Сибирского моря.

Средняя межгодовая изменчивость холодных морей не велика, составляет порядка от  $1,7$  до  $2$  °С. В морях, которые теплее на Северном морском пути, средняя изменчивость температуры составляет от  $2$  до  $3,3$  °С. Самые высокие стандартные отклонения находятся в северной части Карского моря и у мыса Желания, они равны  $3,3$  и  $3$  °С.

Такое же распределение построено для летнего сезона (рисунок 3.8).

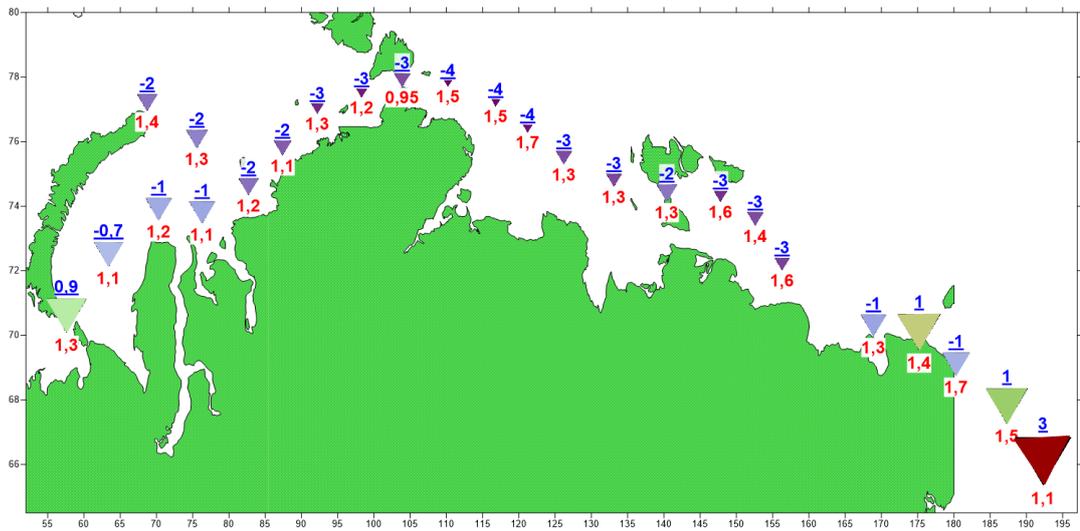


Рисунок 3.8 — Средняя летняя за период 1981-2015 гг. температура воздуха, °С (сверху) и ее стандартное отклонение (снизу).

Несмотря на то, что на карте (рисунок 3.8) летний сезон, температуры воздуха в Арктическом регионе все в среднем, отрицательные и максимально достигают  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Самые холодные остаются море Лаптевых и западная часть Восточно-Сибирского моря.

Участки со средней положительной температурой воздуха это — пролив Карские ворота и Берингов пролив. В Карских воротах средняя температура воздуха равна  $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в Беринговом проливе достигает  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Характеристика изменчивости говорит о том, что летом в районе, где стандартное отклонение больше среднего значения (районы Карского моря и Берингова пролива) температура часто бывает положительная. А в море Лаптевых и в западной части Восточно-Сибирского моря, в среднем, температура воздуха ниже нуля.

Для сезонных составляющих температуры воздуха рассчитаны коэффициенты трендов и коэффициенты детерминации  $R^2$  (рисунки 3.9 и 3.10).

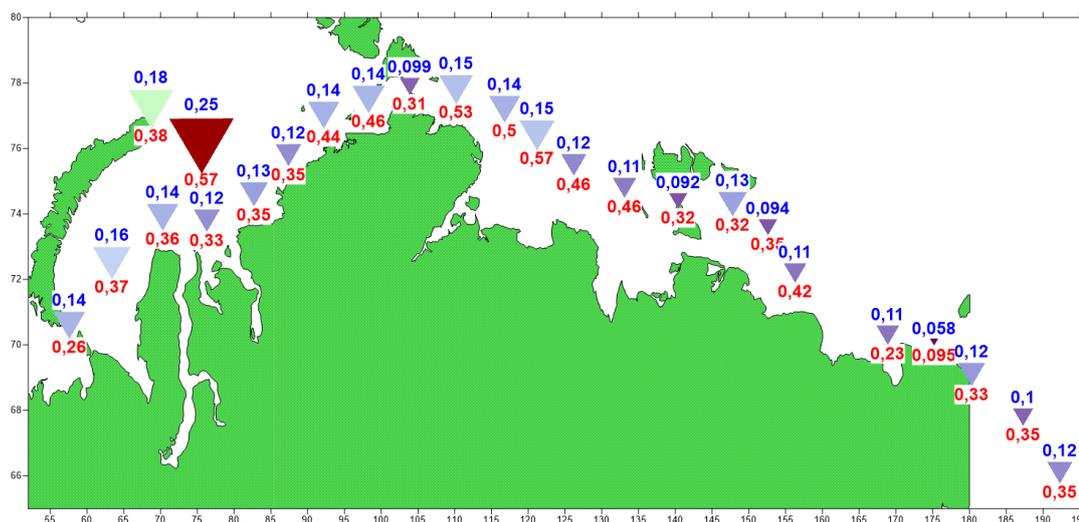


Рисунок 3.9 — Коэффициенты трендов температуры воздуха (сверху) и коэффициент детерминации  $R^2$  (снизу) для средней зимней температуры воздуха за период 1981-2015 гг.

На карте (рисунок 3.9) показаны коэффициенты трендов и детерминации  $R^2$ , которые абсолютно все оказались значимыми, это говорит о том, что температура в Арктике повышается с коэффициентом детерминации  $R^2$  от 0,2 до 0,6, то есть это порядка 60% изменчивости и величина тренда составляет от 0,1 до 0,18 °C в год.

Максимальная величина тренда наблюдаются в Карском море, в северной его части и составляет 0,25 °C в год. Есть одна точка в которой коэффициент детерминации меньше уровня значимости, она находится в северо-западной части Восточно-Сибирского моря.

Тренды температуры воздуха летом (рисунок 3.10) характеризуют такое же значительное повышение температуры, как и зимой, так как все тренды с положительным знаком и превышают уровень значимости, который для сезонного ряда равен 0,1. Величина тренда меньше, чем зимой и в основном от 0,07 до 0,13 °C в год.

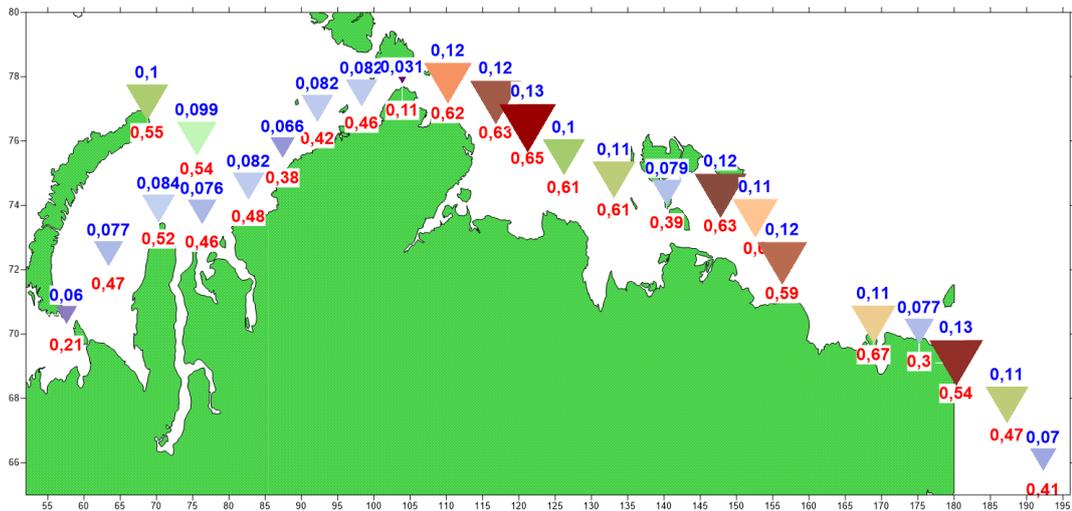


Рисунок 3.10 — Коэффициенты трендов (сверху) и коэффициенты детерминации  $R^2$  (снизу) для средней летней температуры воздуха за период 1981-2015 гг.

Так же мы можем видеть, что летом в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море тренды значительные, коэффициент детерминации  $R^2$  составляет порядка 60% изменчивости температуры. В Карском море  $R^2$  чуть меньше, примерно 50%, но это тоже говорит о значительном изменении температуры воздуха в Арктике.

Если сравнить коэффициенты трендов зимой (рисунок 3.9) и летом (рисунок 3.10), то можно заметить, что участки СМП не равнозначны по изменчивости температуры по сезонам. Зимой большие тренды отмечаются в северной части Карского моря, а летом большие изменения происходят в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море.

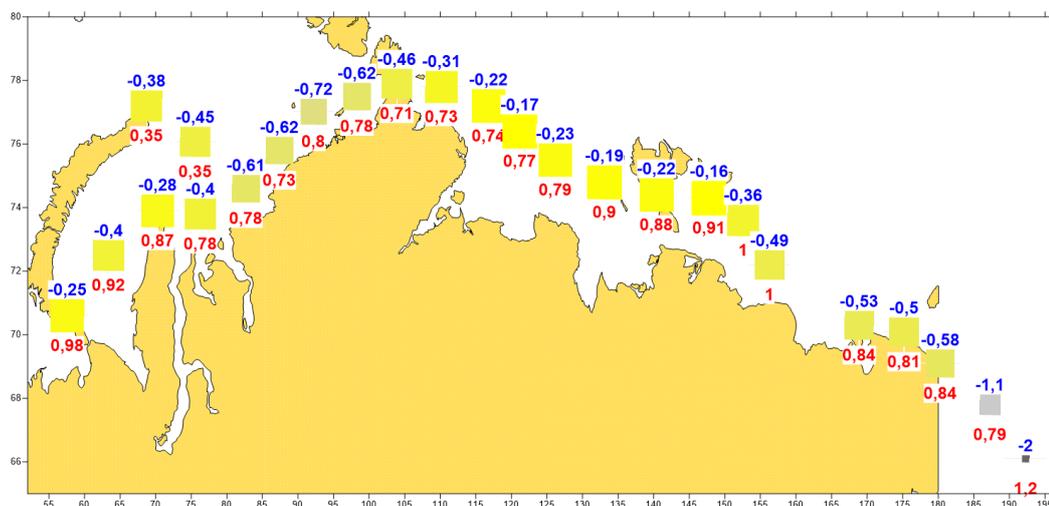
### 3.3 Изменчивость зональной и меридиональной составляющей ветра

Помимо исследования изменчивости температуры воздуха, были проведены оценки средних значений зональной и меридиональной составляющей ветра за зимний и летний сезоны.

На рисунке 3.11 (а), квадратами представлена средняя зональная составляющая ветра и его стандартное отклонение за зимний сезон 1981-

2015 г. На рисунке 3.11 (б), звездами представлено среднее значение меридиональной составляющей ветра и его стандартное отклонение.

а)



б)

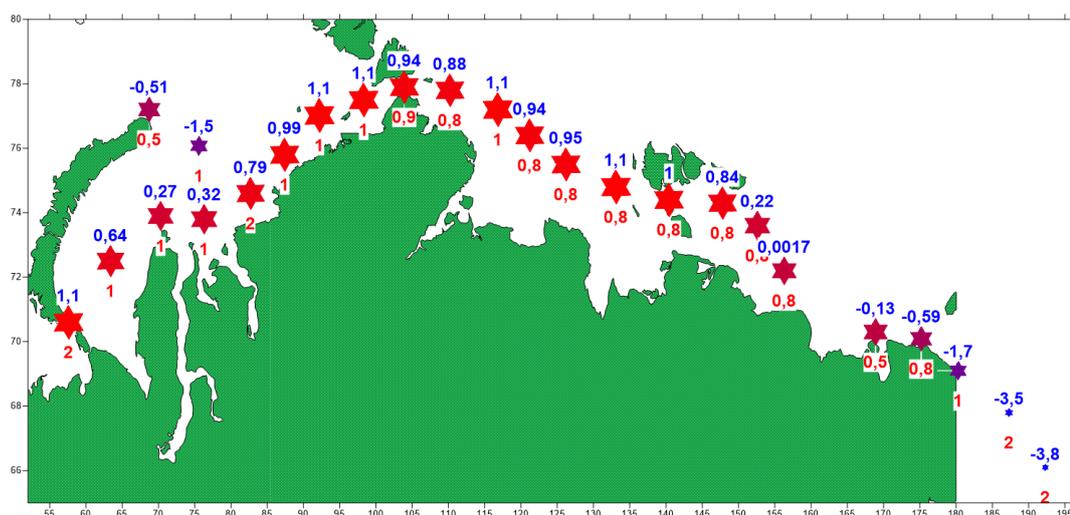


Рисунок 3.11 - Средние зимние значения зональной (а) и меридиональной (б) составляющих ветра за период 1981-2015 гг., м/с, (сверху) и их стандартное отклонение (снизу).

На рисунке 3.11,а видно, что средняя зональная скорость ветра составляет от 0,17 до 2 м/с. В среднем величина характеристики ветра отрицательная, что говорит о том, что над всей акваторией Северного морского пути преобладают ветры восточного направления.

Сами средние значения не велики, причем стандартное отклонение значительно их превышает, это означает, что в среднем ветер меняет знак, то есть ветер меняет свое направления с восточного на западный. Исключение представляют две точки Берингова пролива, можно сказать, что здесь восточные ветры преобладающие, потому что стандартное отклонение не превышает среднее.

На рисунке 3.11,б представлены средняя меридиональная составляющая ветра и его стандартное отклонение. Здесь картина разделяется на два района. Один район определяется северной частью Карского моря и Чукотским морем, где значения меридионального ветра с отрицательным знаком, то есть там дуют северные ветры. А в остальной зоне в основном положительные значения, значит, здесь преобладают южные ветры.

Стандартное отклонение в большинстве случаев такого же порядка, что и среднее, за исключением восточной части Карского моря, что говорит о том, что преобладает появление южного ветра, за исключением участков, в которых наблюдается северный ветер.

В результате можно сказать, что над всей акваторий Северного морского пути зимой господствуют ветры юго-восточного направления, за исключением районов в которых преобладают ветры северо-восточных румбов, а именно в Карском море и Беринговом проливе.

Такие же распределения статистических характеристик зональной и меридиональной составляющих ветра рассчитаны для летнего периода и представлены на рисунке 3.12.

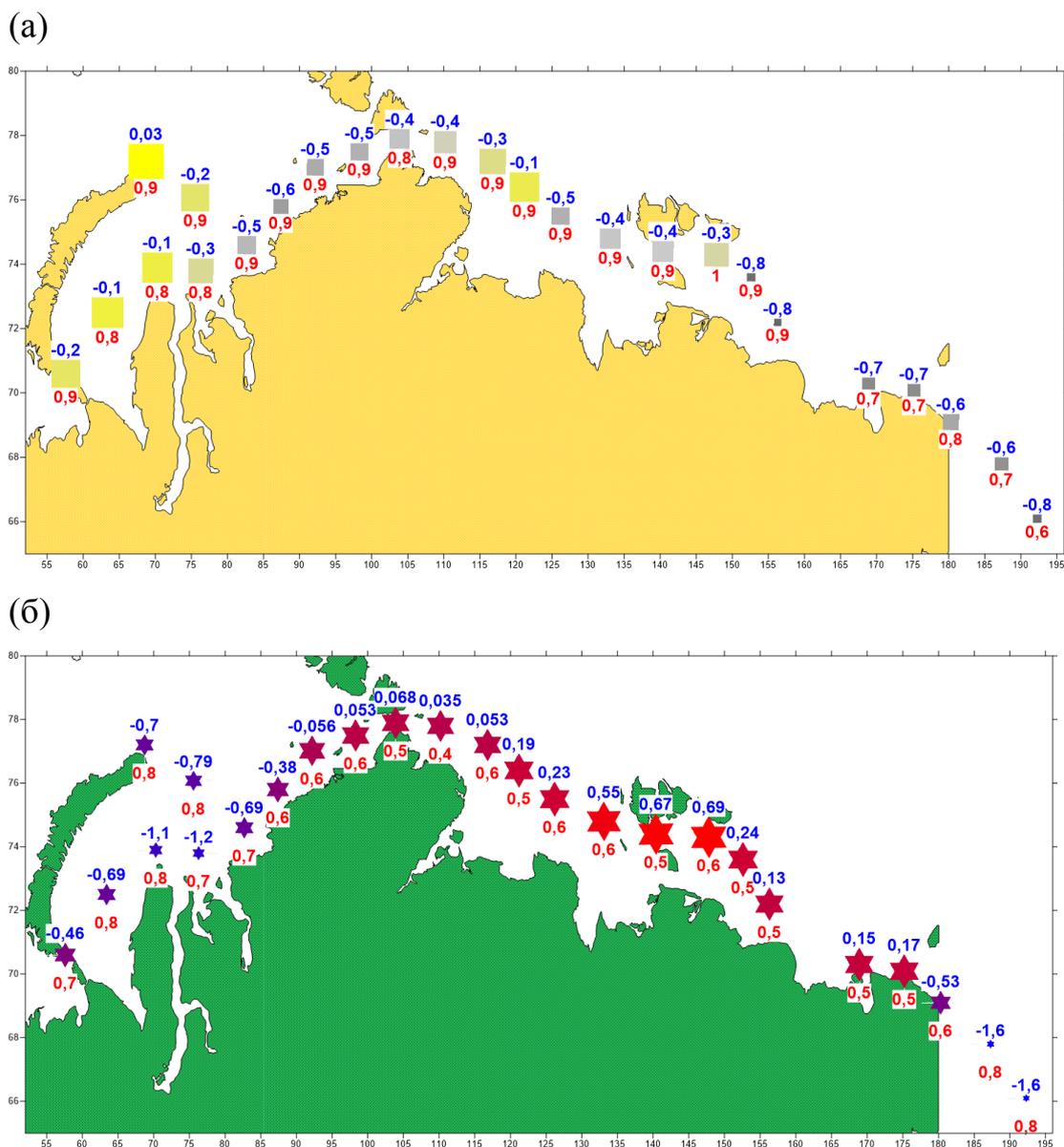


Рисунок 3.12 — Средние летние значения зональной (а) и меридиональной (б) составляющих ветра за период 1981-2015 гг., м/с (сверху) и стандартное отклонение (снизу)

Распределение зональной составляющей ветра, представленное на рисунке 3.12(а), показывает, что на акватории СМП также, как и зимой преобладают ветры восточного направления, кроме одной единственной точки у мыса Желания, где среднее значение скорости ветра около нуля, очень высокие значения стандартного отклонения в сравнении со средним значением, что говорит о преобладании ветра переменных направлений.

На рисунке 3.12(б), где представлена меридиональная составляющая ветра, так же, как и зимой можно разделить регион на 2 района: Карское море и Берингов пролив, где преобладают ветры северного направления, они держатся достаточно устойчиво, потому что стандартное отклонение практически не превышает среднее значение.

В остальной зоне, так как среднее значение очень маленькое, можно сделать вывод, что здесь преобладают ветры переменных направлений.

Таким образом, летом в Чукотском море преобладают ветра северо-восточного направления, в Карском море, предположительно северные ветра, а над всей остальной зоной преобладают ветра переменных направлений.

На рисунке 3.13 представлены тренды межгодовой изменчивости для зональной и меридиональной составляющей ветра зимой. Ромбами показана зональная составляющая ветра, звездой-меридиональная составляющая ветра. Сверху синим цветом представлен коэффициент тренда, снизу, красным цветом представлен коэффициент детерминации  $R^2$ .

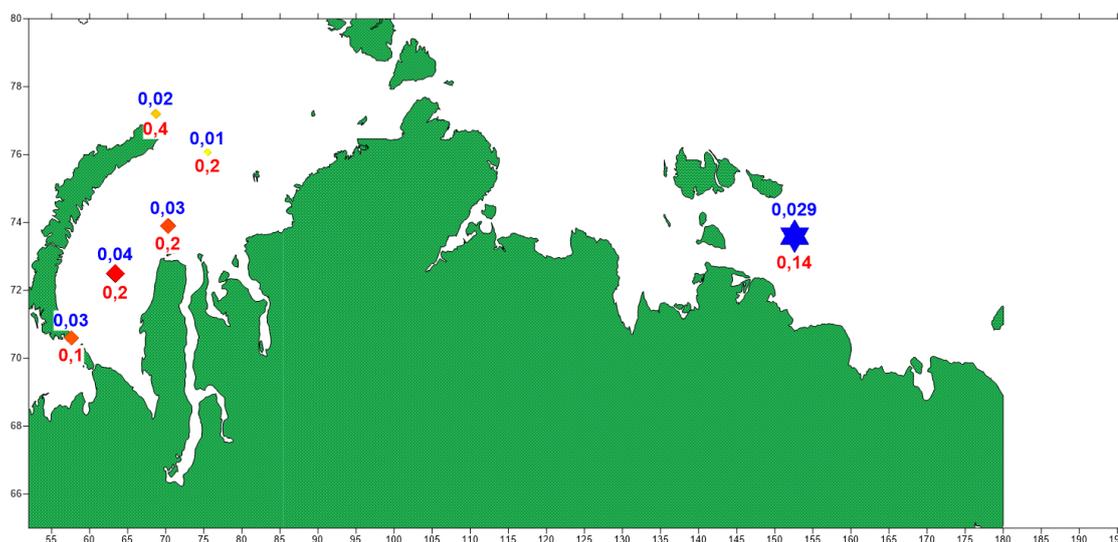


Рисунок 3.13 – Значимые коэффициенты трендов за период 1981-2015 гг., для средних зимних зональной (ромбами) и меридиональной (звездочка) составляющих ветра (сверху), коэффициент детерминации  $R^2$  (снизу).

Из рисунка 3.13 видно, что на большей части трассы СМП ветер с течением времени не изменяется. Исключение составляют два района: западная часть Карского моря и западная часть Восточно-Сибирского моря.

На рисунке 3.13 в западной части Карского моря выявляется тренд на увеличение зональной составляющей. В связи с тем, что общая составляющая восточная, это свидетельствует о том, что в этих точках либо ослабевает восточный ветер, либо он становится западных направлений.

Для подтверждения гипотезы об ослабевании восточного ветра или переходе его на западное направление представлен временной ход точки 1 (рисунок 3.14)

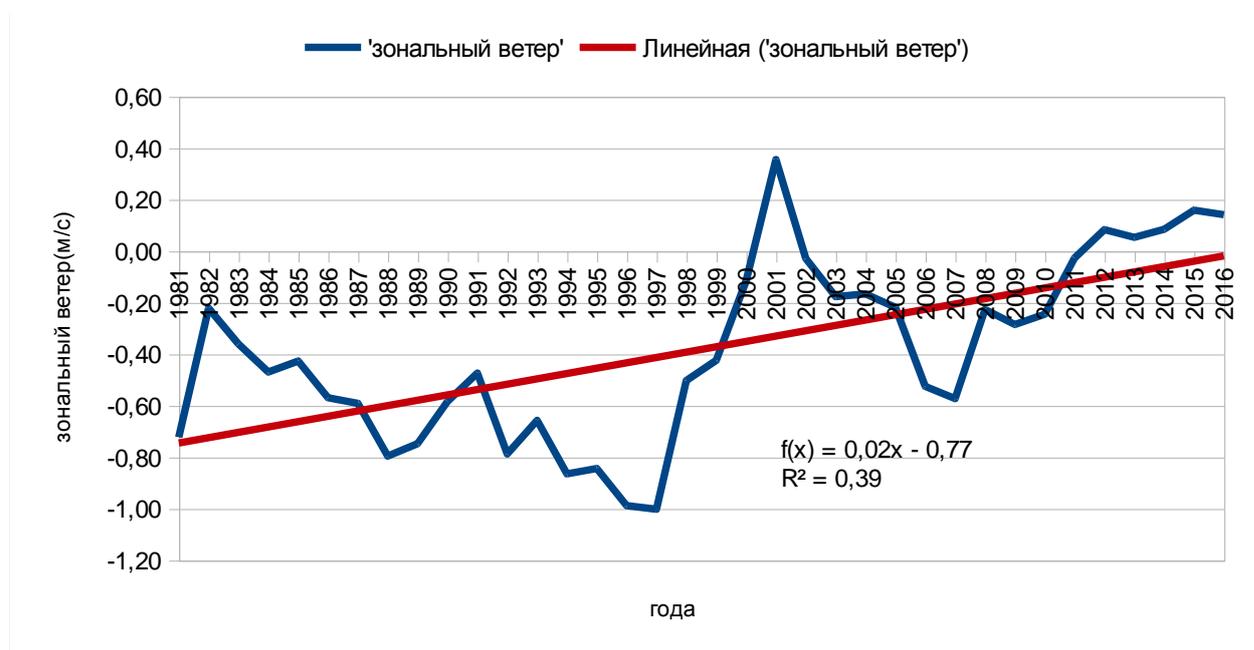


Рисунок 3.14 — Временной ход зональной составляющей ветра в зимний период в точке 24 (Мыс Желания, Карское море)

На рисунке 3.14 видно, что в период с 1981 по середину 1999 года наблюдались отрицательные составляющие ветра, то есть ветер восточного направления, а в последние годы величина составляющей ветра стала положительной, и это значит, что ветер стал западного направления.

По меридиональной составляющей ветра можно сказать, что он имеет положительный знак, это говорит о том, что в этом районе усиливается южная составляющая, но в связи с тем, что точка меридиональной составляющей

только одна, то нельзя сказать о каких-то закономерностях в этом направлении, это может быть случайная величина.

Так же, как и для зональной составляющей ветра, на рисунке 3.15 приводится временной ход меридиональной составляющей ветра для точки 19, где тренд максимален.

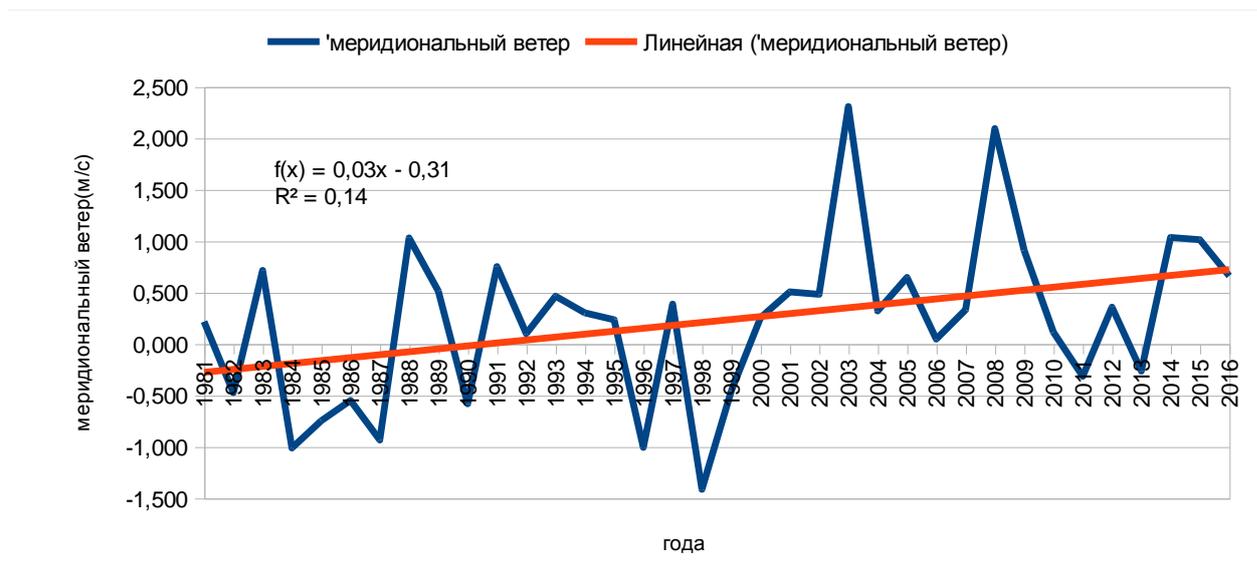


Рисунок 3.15 — Временной ход меридиональной составляющей ветра в зимний период в точке 19 (западная часть Восточно-Сибирского моря)

Из временного хода (рисунок 3.15) видно, что с 1981 по 2000 гг. был ветер переменных направлений, а уже после 2000 года величина составляющей ветра стала расти, это говорит о том, что ветер южных направлений в точке 19 усиливается.

Летом, все наоборот (рисунок 3.16), теперь в Карском море только одна точка со значимым коэффициентом тренда для зональной составляющей ветра, скорее всего, в этой точке ветер меняет свое направление с восточного на западный.

По поводу меридиональной составляющей ветра летом можно сказать, что значимые положительные тренды наблюдаются в районе Новосибирских островов. Это свидетельствует об усилении здесь южных ветров.

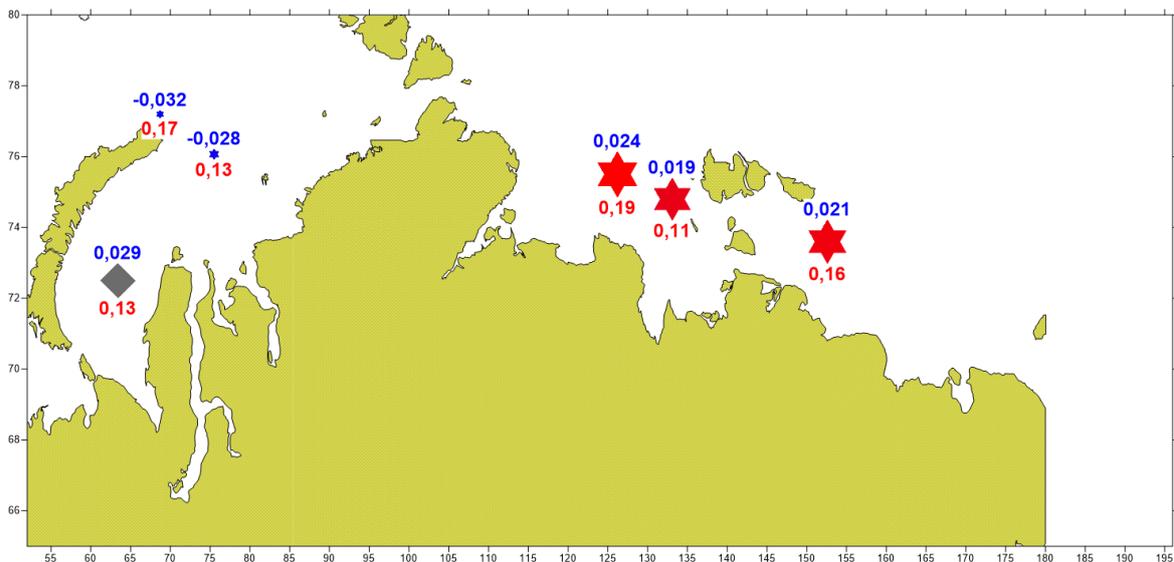


Рисунок 3.16 — Значимые коэффициенты трендов за период 1981-2015 гг., для средних летних зональной (ромбами) и меридиональной (звездочка) составляющих ветра (сверху), коэффициент детерминации  $R^2$  (снизу).



Рисунок 3.17 — Временной ход меридиональной составляющей ветра в летний период в точке 15 (восточная часть моря Лаптевых)

На рисунке 3.17 представлен временной ход меридиональной составляющей ветра в летний период в восточной части моря Лаптевых, из которого видно, что в небольшой период времени с 1983 по 1985 гг. дули

ветры северных направлений, но потом ситуация изменилась и ветер стал южным и величина составляющей ветра стала расти и достигала порядка 1,5 м/с.

### 3.3 Связь ледовитости с гидрометеорологическими характеристиками

Для того чтобы выяснить с какой из характеристик (температурой воздуха, зональной или меридиональной составляющей ветра) связана ледовитость, рассмотрим их значимые коэффициенты корреляции.

На рисунке 3.18 представлены значимые коэффициенты корреляции зональной составляющей ветра (синим цветом под точками) и температуры воздуха (красным цветом над точками) с характеристиками ледовитости на акватории Северного морского пути за зимний период.

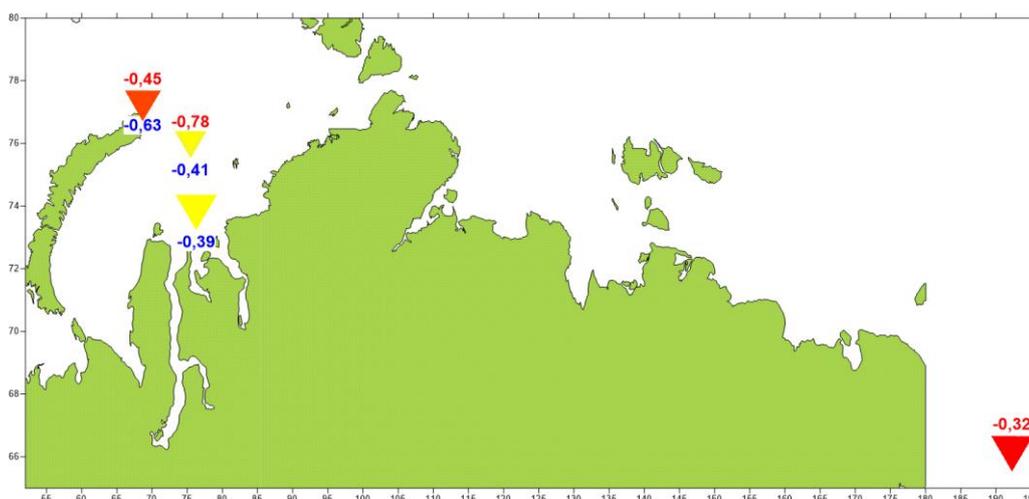


Рисунок 3.18 — Значимые коэффициенты корреляции зональной составляющей ветра (синим цветом под точками) и температуры воздуха (красным цветом над точками) с характеристиками ледовитости на акватории Северного морского пути за зимний период 1981-2015 гг.

Оказалось, что зимой меридиональная составляющая ветра не связана с изменением ледовитости, потому как значимых коэффициентов корреляции ни в одной точке выявлено не было.

На рисунке 3.18 определяется два района со значимыми коэффициентами корреляции – это Карское море и Берингов пролив. В Беринговом проливе в зимний период уменьшению ледовитости способствует только рост температуры воздуха.

В Карском море коэффициенты корреляции зональной составляющей ветра и температуры воздуха с ледовитостью говорят о том, что уменьшение ледовитости происходит из-за усиления восточных ветров и роста температуры воздуха.

На рисунке 3.19 представлены значимые коэффициенты корреляции температуры воздуха с характеристиками ледовитости на акватории Северного морского пути за летний период.

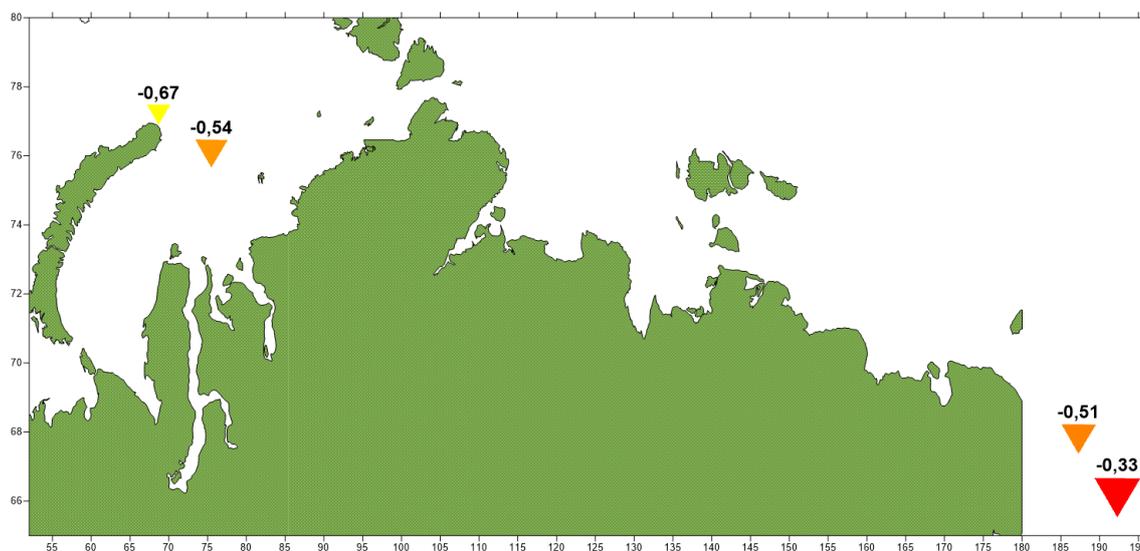


Рисунок 3.19 — Значимые коэффициенты корреляции температуры воздуха с характеристиками ледовитости на акватории Северного морского пути за летний период 1981-2015 гг.

Из рисунка 3.19 видно, что значимые коэффициенты корреляции температуры воздуха с характеристиками ледовитости отмечаются только в северной части Карского моря и в Беринговом проливе. Они составляют от 0,33 до 0,67 и говорят о том, что уменьшение ледовитости происходит из-за роста температуры воздуха.

На рисунке 3.20 представлены значимые коэффициенты корреляции зональной и меридиональной составляющих ветра с характеристиками ледовитости на акватории Северного морского пути за летний период 1981-2015 гг. Из рисунка видно, что коэффициенты корреляции зонального и меридионального ветра не велики и в основном отрицательны.

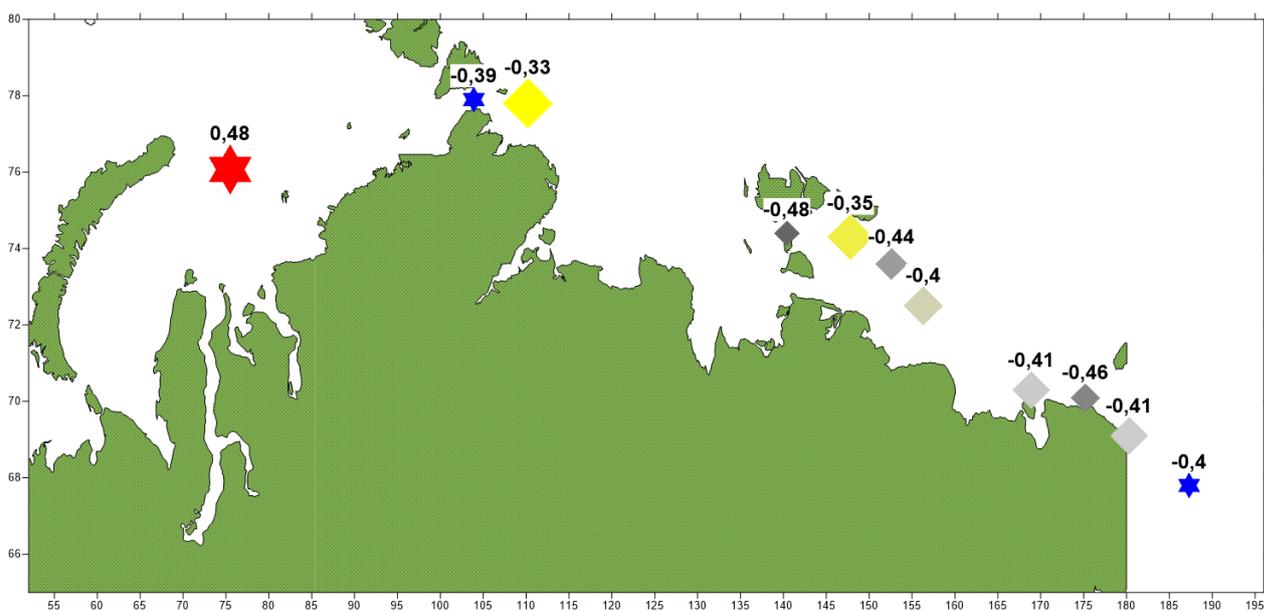


Рисунок 3.20 — Значимые коэффициенты корреляции зональной (ромбами) и меридиональной (звездочками) составляющих ветра с характеристиками ледовитости на акватории Северного морского пути за летний период 1981-2015 гг.

Зональная составляющая ветра летом связана с ледовитостью только на акватории Восточно-Сибирского моря. Отрицательный знак коэффициента корреляции показывает, что уменьшение ледовитости сопровождается усилением западного ветра.

Отрицательные значимые коэффициенты корреляции меридиональной составляющей ветра с ледовитостью в проливе Вилькицкого и Беринговом проливе означают, что уменьшение ледовитости там может быть связано с усилением южного ветра. Уменьшение ледовитости в Карском море связано с усилением северного ветра.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате работы были сформированы среднемесячные и среднегодовые (сезонные) ряды ледовитости СМП, исследована величина изменчивости ледовитости СМП и других гидрометеорологических характеристик, а также выяснена связь ледовитости с гидрометеорологическими характеристиками.

В результате можно сделать следующие выводы:

1. средние многолетние колебания ледовитости обладают большой внутригодовой изменчивостью;
2. зимой на трассе СМП ледовая обстановка практически неизменна, акватория плотно занята льдом, исключая Карское море, в котором средняя изменчивость величины льда достаточно высокая, можно предположить что на ледовитость Карского моря влияет Новоземельская полынья, которая может являться очагом очищения акватории ото льда.
3. Летом количество льда заметно уменьшается, оно составляет от 0,7 до 1,1 % в год. Максимально освобождается ото льда северная часть Карского моря, мыс желания, восточная часть Восточно-Сибирского моря и Берингов пролив.
4. Если сравнить коэффициенты трендов температуры воздуха зимой и летом, то можно заметить, что участки СМП не равнозначны по изменчивости температуры по сезонным составляющим. Зимой больше тренда в северной части Карского моря, а летом большие изменения происходят в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море.
5. Над всей акваторией Северного морского пути зимой господствуют ветры юго-восточного направления, за исключением районов в которых преобладают ветра северо-восточных румбов, а именно в Карском море и Беринговом проливе.

6. Летом в чукотском море преобладают ветра северо-восточного направления, в Карском море предположительно дуют северные ветры, а над всей остальной зоной преобладают ветра переменных направлений.

7. Связь ледовитости с гидродинамическими характеристиками показала, что зимой меридиональный ветер не связан с ледовитостью. В Карском море коэффициент зональной составляющей ветра и температуры воздуха со льдом говорят о том, что уменьшение ледовитости происходит из-за усиления восточных ветров и роста температуры воздуха.

8. В Беринговом проливе связано только с ростом температуры воздуха.

9. В Восточно-Сибирском море летом уменьшение ледовитости связано с усилением западных ветров.

10. Отрицательные значения коэффициента корреляции меридиональной составляющей ветра с ледовитостью, летом, в проливе Вилькицкого и Беринговом проливе означают, что уменьшение ледовитости связано с усилением южных ветров, а в Карском море уменьшение связано с усилением северных ветров

Таким образом очевидно, что уменьшение ледовитости наблюдается только в двух районах трассы Северного морского пути, это-Карское море, а именно северная его часть, и Берингов пролив. Изменчивость ледовитости здесь связано с усилением зональной составляющей ветра и ростом температуры воздуха. Но корреляционный анализ показывает что изменения не такие значительные и нельзя говорить о глобальном изменении климата в Арктике.

На остальных морях СМП ледовитость мало изменчива, льды здесь присутствуют практически круглый год.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зашли с севера, сможет ли Россия воспользоваться выгодами Северного морского пути [электронный ресурс] – электрон. текстовые дан.- режим доступа: URL <https://lenta.ru/articles/2016/03/15/northsearoute/>
2. Откуда начинается и где проходит Северный морской путь [электронный ресурс] – электрон. текстовые дан.- режим доступа: URL <http://xn----8sbbmfaxaqb7dzafb4g.xn--p1ai/otkuda-nachinaetsya-gde-proxodit-severnoy-morskoj-put/>
3. Справочник по ледовым условия плавания на Северном морском пути [электронный ресурс] – электрон. текстовые дан.- режим доступа: URL [http://www.aari.ru/resources/a0011\\_12/manual\\_smp/content.html](http://www.aari.ru/resources/a0011_12/manual_smp/content.html)
4. Северный морской путь: история освоения, экономическое значение [электронный ресурс] – электрон. текстовые дан.- режим доступа: URL <https://cont.ws/post/110246>
5. М.В. Крыленко, В.В. Крыленко Научное обеспечение сбалансированного планирования хозяйственной деятельности на уникальных морских береговых ландшафтах и предложения по его использованию //Моря арктического бассейна Т. 4 [электронный ресурс] – электрон. текстовые дан.- режим доступа: URL <http://www.ocean.ru/content/view/1892/41/>
6. Трассы Северного морского пути [электронный ресурс] – электрон. текстовые дан.- режим доступа: URL <http://xn----8sbbmfaxaqb7dzafb4g.xn--p1ai/trassy-severnogo-morskogo-puti/>
7. Бенземан В.Ю. Комендантов В.Н. Шматков В.А. Арктическая морская транспортная система: короткая история и перспективы развития/Бенземан В.Ю. Спб 2004 — 50 с.
8. Филиппов В.В., Жуков М.А. Проблемы экономического развития арктической зоны Российской Федерации // НЭП – XXI век. Наука Экономика Промышленность. 2006. № 2. С. 19–22.

9. Какой климат в Арктике [электронный ресурс] – электрон. текстовые дан.- режим доступа: URL <http://xn----8sbbmfaxaqb7dzafb4g.xn--p1ai/klimat-arktiki/>