



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

Кафедра прикладной океанологии ЮНЕСКО-МОК и охраны природных вод

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

**«Изменчивость характеристик ледовитости вдоль трассы Северного
морского пути»**

Исполнитель: Татаренко Юрий Алексеевич, студент группы ПО-М17-1-8

Научный руководитель: д.г.н., профессор, Малинин Валерий Николаевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт-Петербург

2019

Оглавление

Список используемых сокращений.....	4
Введение.....	5
1. Характеристики Северного морского пути.....	9
1.1 Географическое описание исследуемого района	9
1.2 Климат Арктики.....	10
1.3 История освоения Арктики	12
1.4 Моря северного морского пути.....	15
1.4.1 Баренцево море.....	15
1.4.2 Карское море.....	20
1.4.3 Море Лаптевых.....	25
1.4.4 Восточно-Сибирское море	28
1.4.5 Чукотское море.....	31
1.5 Перспективы и сложности развития Северного морского пути	34
2 Методы исследования и исходные данные	37
2.1 Исходные данные	37
2.2 Статистические методы исследования.....	38
2.2.1 Анализ временного тренда.....	38
2.2.2 Спектральный и гармонический анализ	40
3 Исследование временной изменчивости характеристик ледовитости вдоль трассы Северного морского пути	42
3.1 Среднее многолетнее состояние ледовитости арктических морей и Северного Ледовитого океана	42
3.2 Временная изменчивость концентрации льда за март и сентябрь в точках на трассе СМП.....	46

3.2.1	Анализ трендов в точках на СМП	47
3.2.2	Гармонический анализ Фурье и спектральный анализ концентрации льда в марте и сентябре в точках на СМП	52
3.2.3	Выход на безлёдный режим в выбранных точках на трассе СМП	55
	Заключение	59
	Приложение А – Спектры разложения Фурье за март 1982-2018 гг.	63
	Приложение Б – Спектры разложения Фурье за сентябрь 1982-2018 гг.....	65
	Приложение В – Таблица характеристик гармоник в марте за период с 1982 по 2018 гг.....	67
	Приложение Г – Таблица характеристик гармоник в сентябре за период с 1982 по 2018 гг.....	68
	Приложение Д – Результаты гармонического анализа за март 1982-2018 гг. ...	69
	Приложение Е – Результаты гармонического анализа за сентябрь 1982-2018 гг.	73
	Приложение Ж – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точках вдоль трассы СМП в марте, за период с 1982 по 2018 гг.....	76
	Приложение З – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точках вдоль трассы СМП в сентябре, за период с 1982 по 2018 гг.	80

Список используемых сокращений

СМП – Северный морской путь

БМ – Баренцево море

КМ – Карское море

МЛ – Море Лаптевых

ВСМ – Восточно-Сибирское море

ЧМ – Чукотское море

СЛО – Северный Ледовитый океан

ЗФИ – Земля Франца-Иосифа

Введение

Актуальность работы. В настоящее время в связи с началом изучения приполярных месторождений, формирования временного судоходства, увеличения количества экспедиций и туристических рейсов в Арктику, значимость Северного морского пути (СМП) существенно увеличилась. В настоящее время принимается решение экономического развития приполярного района при условии сбережения уникальной природы Арктики. Работа идет в разных направлениях: в сфере законодательного регулирования, развития инфраструктуры СМП, совершенствования тарифного регулирования и организации плавания судов в акватории СМП.

В целом же Северный морской путь (СМП) является судоходной магистралью и проходит вдоль берегов Российской Арктики, соединяет порты Европы, и дальневосточные порты, а так же СМП связывает незамерзающий порт Мурманск с портом Провидения и Владивосток и Санкт-Петербургом. Кроме того к СМП относятся судоходные реки. К ключевым портам СМП считаются Диксон, Провидение, Тикси, Певек, Игарка, Дудинка.

Можно дать следующие характеристики экономико-географическому положению, которое соответствует Северному морскому пути:

- относительная выгодность использования по сравнению с другими магистралями для передвижения из Европы в Азии. Например, путь от Санкт-Петербурга до Владивостока с использованием Северного морского пути составляет 14 280 км, что же касается протяженности пути между этими городами с использованием Суэцкого канала, то в данном случае путь составит 23 200 км.

- использование СМП также имеет значение и в мировых масштабах. По данному пути могут проходить корабли из Европы до Японии и Китая примерно за двадцать – двадцать пять дней. При использовании маршрутов

через Суэцкий канал или вокруг Африки, время маршрута составляет от 40 до 50 дней;

- Северный морской путь играет очень важную роль также в единой транспортной системе России. Морями, по которым пролегает Северный морской путь, а также реками, впадающими в данные моря, образуется единая система, благодаря которой имеет возможность соединения территории по всей стране, ведения торговли, а также обмена ресурсами между субъектами Российской Федерации;

- для полноценного функционирования Северного морского пути необходимы значительные ресурсные вложения для того, чтобы обеспечить проведение исследований, которые касаются образования и передвижения льдов, обеспечить безопасность, составить метеопрогнозы, составить и обновить маршруты движения транспорта;

- на протяжении всего Северного морского пути, а также на тех территориях, которые он связывает, на территории арктического шельфа располагаются полезные ископаемые;

- на международном уровне всё ещё имеются споры, которые касаются прав на арктический шельф;

- для освоения арктических территорий, а также из-за важности транспортного коридора, необходима совместная эксплуатация Северного морского пути Россией и иностранными государствами;

- исходя из того, что Северный морской путь соединяет множество субъектов Российской Федерации, он также представляет важность в обеспечении единства Российской Федерации;

- регион, который находится на территории Северного морского пути имеет стратегическое значение в обеспечении безопасности Российской Федерации.

Очень важно, что Северный Морской Путь является значимым объектом не только потому, что он представляет собой кратчайший путь из Европы в Азию, но и в связи с тем, что территории, через которые он проходит, являются центром сосредоточения природных богатств России. Эта магистраль в 2,5 раза короче, чем другие судоходные торговые пути, проходящие через Суэцкий и Панамский каналы. Данная магистраль считается самой короткой для своевременной доставки грузов в порты Арктики, Европы и Азии. Севморпуть — это трасса через моря, расположенные в Северном Ледовитом океане, а также Берингово море (Тихий Океан), которая располагается в сложных арктических условиях. Тем не менее, она имеет под собой огромный потенциал для экономического, социального и научного развития как прилегающих ему северных территорий Российской Федерации, так и всей страны в целом.

Объект исследования: трасса Северного морского пути

Предмет исследования: изменчивость характеристик ледовитости вдоль трассы Северного морского пути

Целью данной работы является исследование межгодовой и внутригодовой изменчивости ледовитости вдоль трассы Северного морского пути. Исходя из поставленной цели, решались следующие **задачи**:

1. Обзор исследований временной изменчивости ледовитости арктических морей вдоль трассы Северного морского пути.
2. Статистический анализ внутригодовой изменчивости ледовитости морей Российской Арктики.

3. Особенности временной изменчивости ледовитости в реперных точках на трассе Северного морского пути в марте и сентябре.

Данная работа состоит из введения на 3 страницах, 3 глав на 60 страницах, заключения на 2 страницах, списка использованных источников из 15 наименований, из них на русском языке – 13, на английском языке – 2, приложений на 20 страниц.

1. Характеристики Северного морского пути

1.1 Географическое описание исследуемого района

СМП ограничивают западные входы в новоземельные проливы и меридиан, который проходит на север от мыса Желания, а в восточной части в Беринговом проливе его ограничивает параллель, которая соответствует 66 градусам северной широты и меридиан 168° 58' з. д. Протяженность Северного морского пути от Карских Ворот до бухты Провидения составляет 5600 км. Навигация по открытой воде составляет всего три месяца (с сентября по ноябрь).[1]



Рисунок 1.1 – Трасса Северного морского пути [1]

1.2 Климат Арктики

Из-за того, что Северный морской путь пролегает по приполярным морям, то можно говорить о климате Арктики в целом.

В арктическом поясе господствует арктический климат. Основной особенностью климата – низкие годовые температуры, что обусловлено значительными затратами тепла на таяние снега и льда и активным выхолаживанием в зимний период. Так как в данном регионе присутствует продолжительная полярная ночь и день, радиация поступает весьма неравномерно. Зимой интенсивна циклоническая деятельность. Высокая температуры воздуха, большая облачность, большое количество осадков, внезапная смена погоды и не редкие мощные (ураганные) ветры связаны с приходом с Атлантики и реже с Тихого океана северными циклонами. Антициклоны развивается зимой в основном над Сибирским, Канадским и Гренландским районами Арктики, где господствует Арктический антициклон, приносящий более невысокие температуры воздуха, небольшую облачность, маленькое число осадков и несильные или средние ветры.

Летом наблюдается обратная картина, нежели зимой при этом воздействие атмосферной циркуляции незначительно относительно зимы. Климатическая обстановка практически всего приатлантического района Арктики находится под влиянием тёплого Северо-Атлантического течения и атлантических циклонов. Течения Тихого океана значительно слабее из-за меньшего их притока через узкий и мелководный Берингов пролив.

Средние зимние температуры воздуха на севере схожи с температурами на юге, однако очень изменяются с запада на восток: с -3°C в юной части приатлантического района до -16°C в притихоокеанском районе; -40°C отмечаются на северо-востоке Якутии. Абсолютная влажность низкая,

а относительная влажность высокая (80–90%). У побережья Евразии преобладают неустойчивые и сильные южные и юго-западные ветры; часты метели. Средние летние температуры воздуха поднимаются от 0 °С в центральной части Арктики и в Арктическом бассейне до 2–3 °С вблизи побережья и 6–13 °С в южной части континентальных р-нов. В центральной части Гренландии июльские температуры не выше –10...–12 °С. Заморозки возможны в течение всего лета: в южных районах до –4 °С, а в Арктическом бассейне до –7 °С. В континентальных районах в отдельные дни температуры поднимается до 25–30 °С. В приатлантических и притихоокеанских районах за год выпадает около 700 мм осадков, а в континентальных районах от 100 мм до 250 мм. Часты туманы и облачность. На материке идут мелкие дожди, в некоторых случаях с мокрым снегом. Так как наблюдаются низкие температуры и низкая испаряемость, то создаётся избыточное увлажнение, особенно в низинах, где влага задерживается по причине многолетней мерзлоты.

Морской лёд представляет собой наиболее чувствительную компоненту глобальной климатической системы. Площадь морского льда в Арктике стремительно уменьшается, периодически ставя новые "зимние" и "летние" рекорды по минимальной площади северной ледовой шапки Земли. Возможно, площадь современного ледяного покрова является минимальной примерно за последние 1500 лет [2]. Основной причиной происходящего сокращения арктического ледяного покрова является наиболее распространенное мнение о том, что оно вызвано глобальным потеплением климата, обусловленным повышением содержания парниковых газов в атмосфере.

Действительно, климат Арктики теплеет гораздо быстрее, чем в среднем на планете. Средняя температура в Арктике с 1900 г. повысилась примерно на 2.5 °С, в то время как для земного шара на 1 °С (Рисунок 1.1), причем в последние 30 лет отмечается ускорение роста температуры в Арктике по сравнению с глобальной температурой [3]. 2018 год также продемонстрировал

очень сильное потепление над Арктикой, которое значительно превышает среднюю скорость потепления на Земле. Такое явление, которое получило название полярного усиления. В результате таяния морского льда потепление в арктических регионах заставляет океан поглощать больше солнечного света, что способствует еще большему потеплению. 2018 год стал шестым самым теплым годом в Арктике. [4]

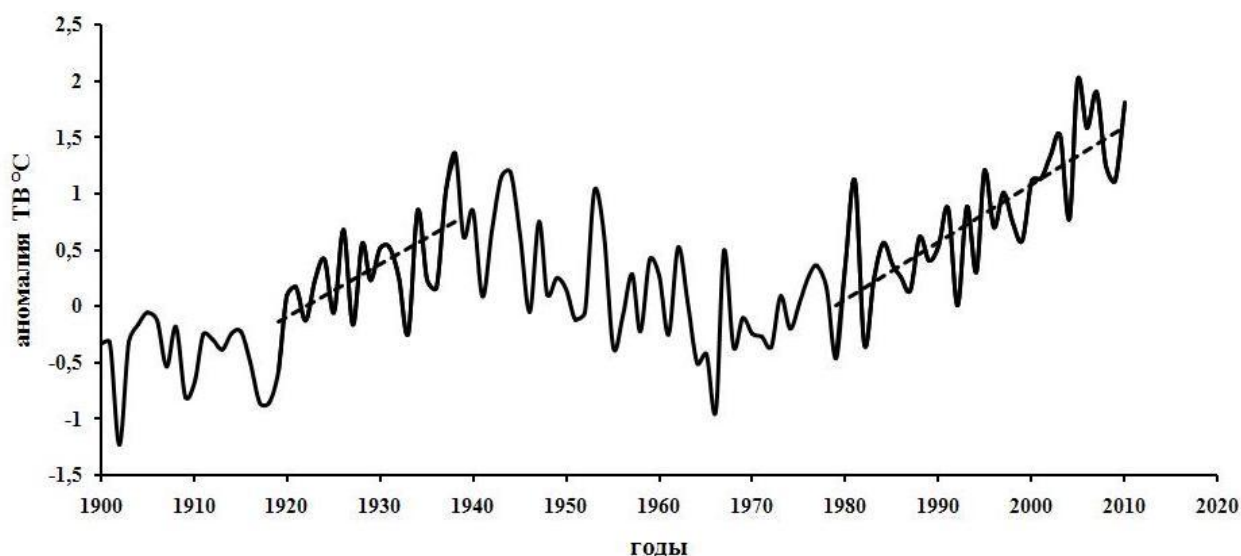


Рисунок 1.1 – Межгодовой ход аномалий средней годовой температуры воздуха осредненной для поверхности земли широтной зоны 64–90° с.ш. за период 1900–2014 гг. [4]

1.3 История освоения Арктики

Идея освоения Северного морского пути была выдвинута М.В.Ломоносовым. По его инициативе была организована полярная экспедиция

В.Г.Чичагова для “поиска морского проходу Северным океаном в Камчатку”.
[1]

Первое сквозное плавание по Северному морскому пути удалось совершить только в 1878-1879 годах — экспедиция А.Норденшельда с одной зимовкой по пути достигла берегов Чукотки. А в 1914-1915 годах Северным морским путем прошла гидрографическая экспедиция Б.Вилькицкого и П.Новопашенного на ледокольных пароходах “Таймыр и “Вайгач”, но уже в обратную сторону — из Владивостока в Архангельск. В апреле 1919 года был основан Комитет Северного морского пути при правительстве России. Главной целью первых экспедиций в Арктику революционной России стала доставка товаров, в первую очередь, хлеба из Сибири, а также усиление границ и укрепление советской власти в Арктике.

В ходе Второго Международного полярного года (1932 год) был организован поход на ледоколе «А. Сибиряков». С большим трудом пароходу удалось пройти от Архангельска до Берингова пролива за одну навигацию. Согласно итогам экспедиции на «А. Сибиряков» было установлено решение о необходимости сформировать новую особую организацию, которое назвали Главное управление Семорпути (ГУ СМП или Главсевморпуть). С этого момента, с 17 декабря 1932 года, и началось планомерное освоение главной северной трассы страны. Основными задачами ГУ СМП были определены: “окончательное открытие Северного морского пути от Баренцева моря до Берингова пролива, организация морских, речных и воздушных сообщений, радиосвязи и исследовательских работ в советской Арктике, развитие производительных сил и освоение естественных богатств Крайнего Севера, содействие подъему коренного населения Крайнего Севера и привлечение этого населения к активному участию в социалистическом строительстве”.

В 34 году двадцатого века, состоялось еще одно сквозное плавание Северным морским путем в одну навигацию. Его совершил ледорез “Ф.Литке” с востока на запад.

Трансконтинентальные перелеты, дрейфующая научная станция “Северный полюс”, строительство новых ледоколов, развертывание метеорологических станций и обсерваторий – все эти успехи СССР в Арктике ускорили развитие Севморпути, а Севморпуть стимулировал научно-технический прогресс в высоких широтах. Все транспорты, двигавшиеся по СМП, не могли миновать Диксон – узловой пункт на арктической трассе. По постановлению ГУ СМП от 22 мая 1934 года здесь начались работы по строительству первых сооружений будущего морского порта. На острове Конус в бухте Диксон было определено место для создания угольной базы длябункеровки судов. В 1935 году причал принял 70 судов, из них 11 морских. Диксон стал перегрузочным портом для ”Норильскстроя”.

Затем строительство основного причала было перенесено на расположенный на материковом побережье мыс Южный бухты

Портовой, так как требования, предъявляемые к бункеровочной базе, расположенной на трассе Севморпути, возросли и остров Конус из-за малых глубин и небольшой площади стал для этих целей непригоден. Строительство нового порта планировали завершить в 1943 году. В годы Великой Отечественной войны по СМП проходили сотни кораблей, которые перевезли более 4 млн. тонн грузов. Для их безопасной доставки организовывались морские конвои, а также защита с моря и воздуха. Продолжалось снабжение флота углем через приполярные порты, которые впоследствии были переведены как подразделения ГУ СМП на военное положение. Послевоенные годы – золотое время Арктики. Один за другим строились ледоколы — только атомных ледоколов в советский послевоенный период было построено семь. Первый из них — “Ленин” — начал работать на трассе СМП в 1960 году. Рост

индустрии и основание новейших перерабатывающих и добывающих производств, требовал огромного рывка для строительства новых судов и переоборудования портов. Ключевым портом в то время становится Диксон, который остается основной бункербазой в приполярном регионе до 1958 года. После, он теряет это свое значение, но обретает другое: в 60-е Диксон становится местом формирования морских караванов и бункеровки судов уже жидким топливом и пресной водой, снабжения их продовольствием. Диксон превращается в базовый порт СМП, транспортно-распределительный узел для перевалки и доставки разнообразных грузов для полярных станций и множества других объектов бассейна Карского моря. Диксон по праву называют “воротами Арктики”. Практически до 90-х годов 20-го века администрацией СМП успешно выполнялись задачи по доставке народнохозяйственных грузов в арктические регионы России. Порты Северного морского пути стали главными звеньями коммуникации с “большой землей”, пунктами доставки грузов и вывоза продукции, Для некоторых из них, например, побережья Якутии и Чукотки, Северный морской путь был единственной магистралью, по которой осуществлялось снабжение товарами.

[1]

1.4 Моря северного морского пути

1.4.1 Баренцево море

Географическое положение. Самое западное из морей Арктики на границах Российской Федерации – это Баренцево. Границы моря пролегают между северным европейским берегом островами Шпицберген, Новая Земля,

Медвежий, Вайгач и Земля Франца-Иосифа. Также границы БМ открыты со свободным сообщением тёплых вод Норвежского моря и холодным бассейном СЛО, а также граничит с Карским морем на востоке и Белым морем на юге. Море полностью расположено за линией Полярного круга и границы Баренцева моря условны и соответствуют гидрометеорологическим и геологическим особенностям. Западная граница БМ проходит по линии южной оконечности мыс Юг (арх. Шпицберген) – мыс Нордкап (остров Медвежий) и граничит с Норвежским морем, а на востоке – граница с Карским морем проходит по линии м. Кользат - м. Желания и далее по южным новоземельским проливам. Южная граница моря проходит по берегу материка и дальше по линии от мыса Святой Нос граничит с Белым морем. Северная граница пролегает по северной вдоль северной периферии островов архипелага ЗФИ, дальше от Земли Александры к острову Северо-Восточная земля архипелага Шпицберген. Баренцево море занимает 1405 тысяч км² со средней глубиной 200 метров и средний объём 282 тысячи кубических километров.



Рисунок 1.2 – Акватория Баренцева моря [15]

Климат. Климатические условия БМ формируются близостью тёплого Норвежского моря и холодными районами СЛО. Через БМ протекают линии движения большей части теплых североатлантических циклонов, проходящих на восток и северо-восток вглубь полярных регионов. Зачастую эти тёплые циклоны останавливаются достаточно сильным проникновением гребней полярных антициклонов, которые могут проникать далеко на юг. Особенно стремительно развиваются синоптические процессы в Баренцевом море. Данный район является самым изменчивым и беспокойным по погоде. В сопоставлении БМ с другими северными морями, то можно увидеть, что оно отличается большими температурами, приятными зимами и большим количеством осадков. С юга на север и с запада на восток возрастает суровость климата. Среднегодовая температура воздуха с запада на восток колеблется от $-1,6^{\circ}\text{C}$ до $-10,5^{\circ}\text{C}$. Самые холодные месяцы на побережье характеризуется средними температурами от -10° до -15°C , а на северных островах -20°C и -22°C . Летняя средняя температура июля в различных районах от $+1^{\circ}\text{C}$ до $+7^{\circ}\text{C}$. Находясь под влиянием Атлантического океана и СЛО, климат БМ весьма неоднороден. На севере моря доминируют арктические воздушные массы, а на юге воздушные массы умеренных широт. По климатообразующим факторам в Баренцевом море можно выделить крупных региона: Центральный, и северо – восточный, северо - западный (Восточно - Шпицбергенский), юго - западный (Медвеженский), юго - восточный (Колгуево - Вайгачский).

К мощному влиянием циклонов, тёплого Нордкапского течения относится юго-западный регион. Так как циклоны часто выносят тепло, то отдача тепла от поверхности моря в атмосферу делает этот регион аномально тёплым. Здесь дуют достаточно сильные ветра юго-западных направлений. Зимняя температура воздуха составляет два градуса Цельсия ниже нуля, а летом восемь-девять градусов Цельсия выше нуля. Данный район отличается малой изменчивостью температуры воздуха как в течение дня, так и течение

года, а также большой облачностью, нередкими осадками, неменяющимися направлениями ветра.

В юго-восточном регионе формируются большие градиенты температуры. Это происходит из-за неоднократных смен тёплых воздушных масс на холодные континентальные воздушные потоки с Евразии, поэтому температура стремительно падает на востоке и юго-востоке БМ, то есть на границе с КМ, где происходит взаимодействие с холодными водами через пролив Карские ворота и Югорский Шар. Зимняя среднемесячная температура атмосферы составляет около -7°C , а летняя 7°C .

Акватория находящаяся севернее острова Медвежий – это считается северо-западный район, который подвержен мощному влиянию Арктического бассейна. В данном районе доминируют самые низкие температуры воздуха и воды, также отличается присутствием плавучих льдов и наличием айсбергов. Зима достаточно суровая, в большей степени с ветрами северо-восточной четверти и температурой -22°C .

Центральная и северо-восточная часть Баренцева моря образуют собой четвертый район. Воды Атлантики приходят в этот район вместе с Нордкапским течением, а точнее с его северной и Колгуево-Новоземельской ветвями.

При передвижении циклонов с юго-запада на северо-восток, этот регион ощущает существенное влияние атлантических воздушных масс. Зимой среднемесячные температуры в центральной части составляют от -4°C до -10°C и от $+3^{\circ}\text{C}$ до $+5^{\circ}\text{C}$ летом, а зимой в юго-восточной части от -15°C до -20°C и летом от $+1^{\circ}\text{C}$ до $+3^{\circ}\text{C}$.

Ледовый режим. Баренцево море хоть и относится к ледовитым морям, но в отличие от остальных приполярных морей Арктики оно никогда не замерзает полностью. Это связано с тем, что атлантические воды приносят такое количество тепла, которое не даёт воде достичь точки замерзания. В БМ в

большей степени преобладают льды местного происхождения, только в конце зимы около трёх процентов всех льдов относятся ко льдам других морей. Лишь в отдельные годы появляются многолетние льды в северо-западной и северо-восточной части моря, а также зимой поступают льды из Белого моря и через Новоземельские проливы.

Площадь занятая льдом в Баренцевом море различна во всех районах. Это связано с интенсивностью Нордкапского течения, циркуляцией атмосферы и общим потеплением или похолоданием арктического региона. Максимальная ледовитость обычно формируется в середине апреля, а минимальная ледовитость наблюдается в конце августа и в первой декаде сентября. В аномально теплые года в августе-сентябре акватория моря полностью очищается ото льдов. А в аномально холодные годы ледовитость составляет 40-50% его площади, концентрируясь в основном в северных районах. Амплитуда сезонных колебаний в среднем равна 60%.

Лёд начинает образовываться в северной части в сентябре, затем к октябрю в центральных районах и в ноябре на юго-востоке. В основном доминируют плавучие льды среди которых распространены айсберги. Припай слабо развит и занимает малые площади в Канинско-Печорском районе и у Новой Земли.

В течение зимы морской лед простирается с севера на юг и с востока на запад. Льдообразование продолжается до конца апреля. Затем кромка льда отступает на север и восток вплоть до самого сентября месяца. Это связано главным образом с таянием более тонкого льда. По максимальным среднегодовым значениям ледовитости, кромка льда проходит на расстоянии от 10 до 30 морских миль, вдоль западных берегов островов архипелага Шпицберген. Далее кромка проходит до острова Медвежий постепенно отклоняясь на юго-восток достигая семьдесят четвертой параллели северной широты. Затем кромка обычно поворачивает на юго-запад и достигает берега материка в районе мыса Святой Нос. В апреле большой район юго-восточной части моря обычно покрыт льдом с разной сплоченностью.

Юго-восточная часть БМ не редко освобождается ото льда в мае, но иногда льды наблюдаются здесь до августа. Обычно толщина льда зимой не превышает 70-75 см. В июне-июле ото льда освобождается акватория центрального района моря. Толщина льда к этому времени равна около одного метра. Максимальная толщина льда в 150-160 сантиметров наблюдается на сере Новой Земли у мыса Желания. В августе максимально освобождается акватория ото льда на севере моря.

На протяжении практически всей зимы на открытой акватории БМ наблюдается высокая сплоченность. Но из-за местных ветров не редко образуются обширные полыньи у берегов Новой земли и островов Колгуев и Вайгач. [5]

1.4.2 Карское море

Географическое положение. Карское море относится к окраинным морям СЛО. Граница на севере широко открыта для бассейна Северного Ледовитого океана. Западная граница проходит с Баренцевым морем, а на востоке с морем Лаптевых. Большая часть моря расположена на материковой отмели. Площадь КМ составляет примерно 885,2 тысячи квадратных километра со средней глубиной около 120 метров (максимальная глубина 620 метров) и объёмом вод сто двенадцать тысяч кубических километров. Суша вместе с условными линиями образуют контуры моря. От мыса Желания до мыса Кользат проходит западная граница моря и далее по восточному берегу Новой Земли, до западной границы пролива Карские Ворота от м. Кусов Нос до мыса Рогатый и восточному берегу острова Вайгач, до западной границы пролива Югорский Шар от мыса Кользкат до мыса Арктический на о. Комсомолец (Северная Земля). По западному берегу Северной Земли и границ на востоке

проливов Шокальского, Красной Армии и Вилькицкого образуется восточная граница Карского моря. Берег материка от мыса Белый Нос до мыса Прончищева образуют южную границу КМ.



Рисунок 1.3 - Воды Карского моря [15]

Климат. Карское море характеризуется холодным и полярным климатом. Невзирая на то, что КМ расположено сравнительно близко к Атлантике, оно суровее, нежели Баренцево море, расположенное западнее КМ. В северной части отрицательная температура воздуха наблюдается в течение 9-10 месяцев в году, а в южной части она сохраняется около 7-8 месяцев. В январе месяце средняя температура воздуха составляет от -20°C до -28°C , с наименьшей температурой до -45°C , -50°C . Июльская температура воздуха составляет от $+1^{\circ}\text{C}$ до $+6^{\circ}\text{C}$, с максимальной температурой до 16°C [6].

Так как Карское море расположено между Погода характеризуется нестабильностью, сильными ветрами, резкими перепадами температур, что объясняется пограничным положением Карского моря между условно теплыми

морями северной части Атлантики и очень охлаждающими областями севера Евразии и Центральной Арктики.

Карское море характеризуется продолжительной и холодной зимой. Практически на всей акватории моря отмечаются ветра южных направлений. Средняя скорость ветра составляет семь – восемь метров в секунду. Также не редко наблюдаются дни со штормами. Самая штормовая часть Карского моря – это западная часть. Для КМ характерно такое явление как бора, которая образуется на Новой Земле, Северной Земле и Земле Франца-Иосифа, скорость ветра которой достигает сорока метров в секунду.

Весной циклоны Карского моря ослабевают, и скорость ветра падает до 5 м/с. Это происходит в связи с деструкцией Сибирского максимума и смещением к полюсу Полярного антициклона. И как следствие – характерен стремительный нагрев воздуха, пасмурная и тихая погода с температурой от -5°C до -10°C .

Для короткого и холодного лета Карского моря, характерна погода с частыми дождями и туманами. Скорость ветра 4-5 м/с и в большей степени северного направления. В западной части КМ июльская температура от $+5^{\circ}\text{C}$ до $+6^{\circ}\text{C}$, а на востоке и северо-востоке от $+1^{\circ}\text{C}$ до 2°C . Также вероятны снегопады. К концу августа настаёт осеннее охлаждение воздуха. Температура понижается до отрицательных значений. На западе среднемесячная октябрьская температура колеблется в районе от -2°C до -6°C , а на востоке от -10°C до -12°C . Также деятельность циклонов возрастает, увеличивая скорости ветра до 6-7 м/с.

Речной сток. Материковый сток Карского моря превосходит суммарный сток в остальные моря и составляет около 1350 кубических километров в год [6]. Также материковый сток оказывает большое влияние на КМ (40% его площади) и на такие гидрометеорологические характеристики состояния вод, как солёность, постоянные поверхностные течения и морской лёд. Благодаря термическому и механическому воздействию стока на лёд в предустьевых районах, он очень быстро размывается. В устьевых частях

средняя температура воды Оби $+9,6^{\circ}\text{C}$, а Енисея $+7,0^{\circ}\text{C}$. Также сток тёплых вод осенью может притормозить образование льда в прибрежной зоне.

Кроме того, на накапливающие способности поверхностного слоя тоже влияет воздействие речного стока. Так как поверхностный слой КМ распреснён речными и талыми водами, то способность стремительно поглощать солнечное и атмосферное тепло, что составляет двадцать пять процентов всей тепловой энергии поступающей на него, ограничен двадцатью метрами. [7]

Не смотря на огромное количество впадающих рек в Карское море, основной объём речных вод, который составляет 75-80%, приносят всего две реки – Енисей поставляет 600 кубических километров воды в год, а Обь 450 кубических километров в год. Другие реки, такие как Пур, Пясина, и Таз поставляют восемьдесят, восемьдесят шесть и семьдесят четыре кубических километров в год.

В течение года сток рек весьма неоднороден. На летние месяцы приходится 80-90% речного стока, а зимой мелкие реки промерзают и вода поступает только из крупных рек. Что ведет значительным сезонным колебаниям солёности в поверхностном слое моря. Максимальная амплитуда колебания солёности наблюдается в предустьевых районах и может достигать около 8‰. На широте северной оконечности Новой Земли, широта мыса Желания амплитуда составляет 0–1‰. [7]

Распространение речных вод по акватории Карского моря, зависит от господствующих ветров. Они могут двигаться неширокой полосой к морю Лаптевых вдоль берегов материка, или отклоняться к северо-западу, или распространяться веером по всей акватории КМ.

Ледовый режим. Каждый год Карское море замерзает из-за своих особенностей географического положения. Помимо льда образующегося непосредственно на акватории Карского моря, ещё лёд поступает из центральной части СЛО. [6] Практически весь год акватория почти всего моря покрыта достаточно сплочёнными льдами. С ноября по июнь/июль (7-8 месяцев) юго-западная часть КМ покрыта льдом. Обычно в сентябре месяце на

севере Карского моря начинается льдообразование, и в октябре в ноябре на юге. Неподвижный лед встречается только зимой в виде припая вблизи берегов. Плавающие льды обычно располагаются за припаям и представляют собой обширные ледяные поля. За зиму лёд нарастает до толщины 0,5-1,5 метра. Обычно в конце мая начинается таяние льда и стартует оно в юго-западной части Карского моря.

Молодые и однолетние тонкие льды исчезают в июне в полыньях и разводьях и частично вытаивают средние однолетние льды. Взлом и деструкция припая на обширные дрейфующие поля происходит в процессе таяния ледяного покрова. В восьмидесяти процентах случаев полностью припай разрушается за июнь месяц и происходит это в целом, раньше всего, в Амдерминском районе. В Середина июля взлом припая происходит вдоль берега Ямала и в Обь-Енисейском регионе. Половина юго-западной части КМ очищается ото льда. В восьмидесяти процентах всех случаев к концу августа, к началу сентября акватория этого района полностью освобождается от ледяного покрова. В мористых районах таяние льда происходит значительно медленнее чем в прибрежных районах. Поэтому в июне/июле лёд ещё остаётся в центральных районах юго-западной части моря. Юго-западная часть КМ отличается более быстрым таянием и очищением ото льда, нежели северо-восточная часть. Поэтому взлом припая начинается только в начале июня со стороны кромки. Большая часть припая взламывается в июле и к первой декаде августа припай сохраняется в узкой части прибрежной зоны, находясь между шхерами Минина и южной оконечностью архипелага Норденшёльда. В завершении сезона таяния льда, к сентябрю, в среднем примерно половина района забита остаточным льдом. Самое интенсивное таяние льда происходит в июле и в августе. Шестидесят процентов акватории КМ очищается ото льда в среднем к концу августа, при этом в основном благодаря юго-западной части моря. Из-за таяния и дрейфа льда, в сентябре, освобождается ещё десять пятнадцать процентов акватории моря. В северных районах моря в сентябре замедляются процессы разрушения льда и начинается льдообразование. Также происходит

локализация льдов сплочённостью от семи до десяти баллов в такие ледяные массивы как Новоземельский массив в юго-западной части, который создаёт затор в проливе Карские ворота и к августу исчезает в 80% случаев, а также Североземельский и Северный Карский массивы. [7]

1.4.3 Море Лаптевых

Географическое положение. Море Лаптевых относится к континентальным окраинным морям. МЛ простирается на западе от Северной Землей до полуострова Таймыр и до Новосибирских островов на востоке. Оно принадлежит бассейну СЛО. Через пролив Вилькицкого, пролив Шокальского и пролив Красной Армии оно сливается с Карским морем с западной стороны. Восточная граница проходит с Восточно-Сибирским морем через проливы Санникова, Этерикан и Дмитрия Лаптева. Южная граница ограничена берегами континента Евразия с запада на восток, от мыса Челюскин до мыса Святой. Общая информация: площадь моря Лаптевых составляет примерно 664 тысячи квадратных километров с средней глубиной примерно 530 метров, максимальной глубиной 3385 метров и объемом около 353 тысяч кубических километров. Южная часть МЛ отличается относительно небольшими глубинами до пятидесяти метров, затем к востоку от пролива Вилькицкого глубина значительно возрастает, достигая примерно двухсот метров. Максимальная глубина отмечается в желобе Садко на севере шельфа и составляет 3385 метров.



Рисунок 1.4 - Акватория моря Лаптевых [15]

Климат. Климат здесь континентально-арктический и очень суровый. Уже более девяти месяцев температура ниже нуля градусов по Цельсию в течение года. И только в течение двух месяцев, августа и сентября, море освобождается от связывающего его льда. Юго-восточная часть моря Лаптевых прогревается лучше всего и температура воды достигает от 6°C до 7°C . В центральном районе МЛ, температура воды составляет 3°C - 4°C , а на севере из-за того что большая часть акватории северной части моря Лаптевых покрыта льдом и отражает до семидесяти процентов проходящей радиации, вода может прогреваться только в полыньях примерно до двух трёх градусов Цельсия. В заприпайных полыньях, которые представляют собой мощные аккумуляторы солнечной радиации, температура воды поднимается до 5°C - 10°C . Данный прогрев характерен к востоку от Таймыра и Северной земли. Летом у кромки льда температура воды около 0°C , на акватории свободной ото льда температура обычно составляет от 2°C до 4°C , а в устьях рек в относительно небольшом поверхностном слое температура воды достигает 7°C .

Сток рек. В летний период распределение поверхностной температуры и солености воды помимо ледовой обстановки также обусловлен речным

стоком и взаимодействием с соседними акваториями других вод. Огромный объём речных вод моря Лаптевых, который приносит в море 3120×10^{12} калорий тепла, что составляет тридцать процентов стока во все приполярные моря, является причиной повышения температуры поверхностных вод 5°C . Ярким примером данного процесса служит сравнение температуры воды западной и восточной части моря. Основная масса тёплых вод речного стока приходится на восточную часть моря Лаптевых, которая гораздо теплее западной части, куда поступают холодные воды Арктического бассейна с Таймырским течением. Поэтому в восточной части поверхностная температура воды может быть от 6°C до 8°C , а в западной части она не превышает температуру в два три градуса Цельсия, причём в том числе в наиболее тёплые месяцы. Еще более заметнее речной сток отражается на солёности моря. Распределение поверхностной солёности моря крайне неравномерно и её уменьшение происходит с северо-запада и севера на юго-восток, где зимой солёность воды принимает значения от 20 до 30 промилле, а летом от 10 до 20 промилле. Когда в западной части зимой солёность колеблется от 31‰ до 33‰, а летом от 26‰ до 30‰.

Ледовый режим. Начиная в октябре и заканчивая в мае, море покрыто льдом с разной толщиной и возрастом. Льдообразование начинается в конце сентября и распространяется на все море. Зимой на востоке - обширные быстрые льды до 2 м. В западной и северо-западной части моря быстрые льды малы или полностью отсутствуют. Площадь быстрого льда составляет 30% от общей площади моря [8]. Ломка быстрого льда происходит в июле, в первую очередь в устьях рек Лена и Хатанга.

На море имеются значительные участки полыньи и молодого льда. Ширина полыней составляет от нескольких десятков до сотен километров. К ним относятся такие полыньи, как Восточно-Североземельская, Таймырская, Ленская и Новосибирская, которые летом даже становятся центром ледовой очистки моря. Вместе с тем, площадь этих полыней возрастает и может достигать тысяч квадратных километров. Летом, в июне и июле лед начинает

таять. Ото льда акватория моря освобождается в августе. По средствам влияния ветров и течений, в летний период кромка льда изменяет своё местоположение.

Акватория восточной части моря меньше заполнена льдом, чем западная. Тяжелый многолетний лед встречается в море вдоль восточного побережья полуострова Таймыр, поскольку здесь отрог океанического Таймырского ледяного массива спускается в море. Остается до нового ледообразования и может двигаться как на юг, так и на север, все зависит от активности ветров. Местный ледовый массив Янский образован из припайного льда. Обычно он складывается к концу августа, или, если он не оттаивает до конца, он уносится выше, на север за море [8].

1.4.4 Восточно-Сибирское море

Географическое положение. На западе граница Восточно-Сибирского моря от северного берега острова Котельный и краем континентального берега, до мыса Анисий, что на севере острова Котельный и вдоль восточного побережья Котельных островов, Малого Ляховского и Большого Ляховского, а также западных границ проливов Санникова и Дмитрия Лаптевых.

На берегу материка из точки семьдесят девять градусов северной широты и сто тридцать девять градусов восточной долготы начинается северная граница и пролегает до семьдесят шестой параллели той же широты до самого сто восьмидесятого меридиана восточной долготы. Граница на востоке берёт своё начало от точки 76° северной широты и 180° восточной долготы, проходя по этому же меридиану до острова Врангеля, потом по берегу до мыса Блоссом и от него до мыса Якан, от которого до мыса Святой Нос по береговой линии проходит южная граница. Восточно-Сибирское море входит состав Северного Ледовитого океана и своими водами расположено у восточной часть арктического побережья России. Расположено справа от моря

Лаптевых и слева от Чукотского моря. Географически разделен на западную и восточную части. В среднем наиболее трудные для плавания ледовые условия наблюдаются в восточной части моря. Основными портами являются Певек, а также порты, расположенные в устьевых областях рек Индигирка и Колыма - Чокурдах и Зеленый Мыс. [9]



Рисунок 1.5 - Воды Восточно-Сибирского моря [15]

Климат. Климат арктический, под влиянием воздушных масс двух океанов: Тихого и Атлантического. Зимой дуют юго-западные и южные ветры, унося холодный воздух из Сибири, поэтому средняя температура зимой составляет -30 градусов по Цельсию. Летом дуют северные ветры, а температура воздуха составляет 0-1 градус Цельсия в открытом море и 2-3 градуса Цельсия на побережье. Небо облачно с частыми дождями и мокрым снегом. Береговой туман затягивается, он может продержаться до 70 дней. Годовое количество осадков 200 мм. Средняя температура января составляет около - 28-30 ° С.

Зимой погода в основном ясная. Сохранению низких температур содействуют ветра северных северо-восточных направлений, которые практически стабильно присутствуют здесь. Средняя июльская температура воздуха летом в северном районе моря колеблется от 0°C до +1°C и незначительно выше температура в прибрежном районе МЛ, которая чуть больше +3°C. В северной части моря на понижение температуру влияет воздействие льдов Арктики. Противоположная картина наблюдается в южной части моря, где повышению температуры содействует теснота с тёплым континентом. На понижение температуры воздуха осенью влияет ослабление воздействия Тихого и Атлантического океанов. Тем самым помимо характерного холодного лета, ВСМ в летне-осенний период характеризуется меняющимся ветровым режимом погоды в западных и восточных районах моря. [10]

Ледовый режим. Восточно-Сибирское море - самое арктическое из арктических морей России. С октября - ноября по июнь - июль оно полностью покрыто льдом. В это время преобладает перенос льда из арктического бассейна в море, в отличие от других арктических морей, где преобладает вынос льда. Характерной особенностью ледяного покрова Восточно-Сибирского моря является значительное развитие быстрого льда зимой. При этом припай на востоке ВСМ занимает узкую прибрежную полосу, а на западе распространён более обширно. Подавляющее большинство пространства на востоке моря занято отрогом океанского ледяного массива Айон, который в значительной степени образует тяжелый многолетний лед. В течение всего года его южная периферия прилегает к берегам континента, определяя ледовый режим ВСМ. [11]

1.4.5 Чукотское море

Географическое положение. Чукотское море находится у северо-восточного побережья Российской Федерации. Граница на западе проходит от пересечения сто восьмидесятого меридиана с краем континентального шельфа (76° с.ш., 180° в.д.) вдоль сто восьмидесятого меридиана до острова Врангеля и далее через пролив Лонга и м. Якан, то есть по восточной границы ВСМ. Граница на севере минует семьдесят вторую параллель широты, в сто пятьдесят шесть градусов по восточной долгот до мыса Барроу на Аляске, после чего проходит до входа в бухту Шишмарёва, которая находится на полуострове Сьюард, вдоль берега континента. Граница на юге начинается от туда, где заканчивается западная граница, из бухты Шишмарёва, вдоль северной линии Берингова пролива до мыса Уникын и дальше по берегу до мыса Якан. Западная граница пролива Лонга тоже принадлежит ЧМ и она проходит от мыса Блоссом до мыса Якан. На востоке граница ЧМ пролегает от мыса Пиллар на острове Врангеля до мы Шмидта. Чукотское море является материковым окраинным морем площадь которого составляет 595 тысяч квадратных километров со средней глубиной 70 метров, с максимальной глубиной 1 256 метров объёмом вод в 42 тысячи кубических километров. [12]



Рисунок 1.6 - Воды Чукотского моря [15]

Климат. В общем климат Чукотского моря характеризуется как полярный морской климат. Для этого климата характерны незначительные годовые амплитуды температуры воздуха и малое поступление солнечной энергии. Также в данном районе несколько крупномасштабных барических систем оказывают влияние на Чукотское море в осенний и зимний период. Ответвления Алеутского минимума, Полярного и Сибирского антициклона распространяются на ЧМ в начале сезона и как следствие крайне неустойчивое направление ветров. Почти одинаковую повторяемость имеют ветра различных направлений. Средняя скорость ветра составляет около 6-8 м/с. На мысе Шмидта острова Врангель, температура осенью достигает -8°C в октябре за короткое время из-за быстрого понижения и уже с ноября начинают преобладать ветра северо-западных направлений. После чего в феврале область низкого давления исчезает. Периодически между материками возникает «мост» высокого давления, вследствие слияния отрогов Сибирского и Североамериканского максимумов из-за чего на севере ЧМ преобладают северные и северо-восточные ветра, а на юге северные и северо-западные. Ветра южных направлений над морем дуют преимущественно во второй половине зимы. Средняя скорость ветра обычно около 5-6 м/с. Минимальная

температура в самый холодный месяц февраль, в среднем не превышает -28°C в Уэллене, -25°C на острове Врангеля и -28°C на мысе Шмидта. Это связано с охлаждением Азиатского материка и влиянием тёплого Тихого океана. Зима имеет такие характерные черты как пасмурная, холодная погода с порывистыми ветрами, которая изредка характеризуется притоком тёплых воздушных масс с Берингова моря. Полярный максимум ослабевает и смещается на север в тёплую часть года из-за отсутствия Сибирского и Североамериканского антициклонов. В южной Части ЧМ в весенний период прослеживается полоса пониженного давления, которая пролегает к востоку от Исландского минимума и соединяется с областью низкого давления слабо выраженного Алеутского минимума. К концу сезона неустойчивые по направлению ветра обычно дуют в южном направлении со скоростью не превышающей 3-4 м/с. Тихая, облачная, прохладная и сухая погода обычно характерна для весны. Средняя температура апреля в Уэллене -12°C , а на острове Врангеля -17°C . Летом на акватории свободной ото льда наблюдается слегка повышенное давление из-за приближения к Аляске ответвления Тихоокеанского максимума. Ветры южных и юго-восточных направлений преобладают в южной части Чукотского моря, в то время как в северной части наблюдаются ветра северных и северо-западных направлений. Скорость ветра достигает пяти метров в секунду. Средняя июльская температура, как самого тёплого месяца составляет $+6^{\circ}\text{C}$ в Уэллене, $+2,5^{\circ}\text{C}$ на острове Врангеля и $+3,5^{\circ}\text{C}$ на мысе Шмидта. В закрытых частях ЧК от ветра, температура может достигать выше десяти градусов Цельсия. И уже в августе происходит переход на следующий сезон, поэтому лето достаточно короткое. [13]

Ледяной режим. Лед в ЧМ наблюдается круглогодично. В зимний период ЧМ повсеместно покрыто льдами. В этот период, с ноября/декабря по май/июнь наблюдается неподвижный лёд у самого берега и плавучим далеко от него. Припай развит слабо. Припай окружает вдающиеся в берег бухты и заливы вместе с неширокой полосой вдоль берега с шириной не превышающую от 10 до 20 километров. Дрейфующие льды примыкают к припаю и в основном

этоодно- и двухлетние льды, толщиной не более 150–180 см. многолетние льды встречаются на севере Чукотского моря. Неизменная Аляскинская полынья образуется в следствии продолжительного отжимного ветра. А в западной части ЧМ в это же время образуется Врангелевский ледяной массив. Чукотская заприпайная прогалина, которая расположена вдоль Чукотки, может открыться на многие сотни километров, при этом оставаясь довольно узкой. Кромка льда отступает летом на север. Также в Чукотском море образуются ледяные массивы – это Чукотски и Врангелевский массив. По Чукотскому берегу в отдельные годы, накопленный в проливе Лонга лёд тянется в виде языка. В это время, проход удов крайне затруднён. В другие годы, напротив, лёд отступает далеко от берегов Чукотки, этим создавая благоприятные условия для судоходства. Льдообразование начинается в конце сентября, которое которое со временем покроет всё море. [12]

1.5 Перспективы и сложности развития Северного морского пути

Моря, которые являются частью Северного морского пути, как правило имеют шельфовую зону, глубина которой составляет менее чем 200 м. Эту зону занимают окраины морей. Дно в этих морях представляет собой продолжение частей платформенных структур, которые соответствуют суши. Большая часть дна, которая относится к Северному Ледовитому океану начиная от Евразийского побережья и заканчивая Северным полюсом представляет собой продолжение Сибирской континентальной платформы.

В качестве главных особенностей, которыми характеризуется данная судоходная магистраль можно выделить суровые условия климата и наличие льда на пути плавания судов.

Северный морской путь имеет географическое разделение оконченностью полуострова Таймыр, а также теми островами, которые прилегают к нему с севера, на две части, которые являются Восточной и Западной. Сообщение между этими частями достаточно часто может быть затруднено из-за льдов, которые скапливаются около мыса Челюскина. Западная часть Северного морского пути на данное время представляет собой часть СМП, которая пригодна для круглогодичной навигации.

В зимний период Северный морской путь в его большей части охватывает антициклоническая циркуляция воздуха. В летний период имеет место быть противоположная зимней атмосферная циркуляция. Тем не менее, она менее сильно воздействует на климат, так как обладает более слабой интенсивностью.

Ветры присутствуют практически на всем побережье, вдоль которого пролегает Северный морской путь. Как правило, преобладающими является южный и юго-западные ветра.

Наличие льдов представляет собой единственное препятствие, которое не дает возможность признать Северный морской путь в качестве пути обычного нормального плавания. Однолетние льды могут по толщине соответствовать 0,8-1,8 м. Многолетние льды могут достигать в толщине 3-4 м.

Торосы, как правило, имеют высоту 3-5 м., но в отдельных случаях они могут достигать до 10-15 м. На протяжении СМП можно встретить айсберги и ледяные острова, которые представляют собой участки шельфовых ледников, которые откололись.

Наличие ледяного покрова является существенным затруднением для мореплавания в данных территория, что делает этот путь доступных для транспортных судов исключительно в течение 2-3 месяцев лета. Как правило, транспортные суда на протяжении своего пути сопровождаются ледоколами.

Помимо ледяных торосов, в качестве еще одной физико-географической особенности Северного морского пути является тот факт, что Арктика находится в высокоширотной области. Данный факт является причиной того, что арктические воздушные массы активно циркулируют, что происходит из-за влияния на них воздушных движений со стороны Полярного круга.

Арктические воздушные массы, в свою очередь, распространяются на материковую часть и там встречаются с воздушными массами, которые соответствуют другим потокам. В связи с этим формируются арктические атмосферные фронты. В таких районах присутствует крайне низкая температура воздуха, имеет место быть небольшая облачность, а также незначительное количество осадков.

В качестве особенностей рельефа можно отметить наличие шельфа, который имеет острова материкового происхождения, которые прилегают к материковым окраинам. На текущий момент имеется информация, что шельфовая зона богата залежами нефти, марганца, бокситных руд, свинца и цинка.

2 Методы исследования и исходные данные

2.1 Исходные данные

В настоящей работе использовались данные IRI Data Library, которая является мощным и свободно доступным онлайн-хранилищем данных и инструментом анализа, который позволяет пользователю просматривать, анализировать и загружать сотни терабайт связанных с климатом данных через стандартный веб-браузер. Ежемесячные поля NOAA OI.v2 SST определяются путем линейной интерполяции полей версии 2 еженедельной оптимальной интерполяции (OI) на ежедневные поля с последующим усреднением дневных значений за месяц. Поля за месяц имеют тот же формат и пространственное разрешение, что и поля за неделю. Ледовое поле показывает приблизительное среднемесячное значение значений концентрации льда, вводимых в анализ SST. Концентрация льда сохраняется в процентах от площади покрытия. Для ледяных полей значение 122 представляет сушу или побережье.

Данные по концентрации льда Арктического региона расположены по адресу:

http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.EMC/.CMB/.GLOBAL/.Reyn_SmithOIv2/.monthly/.sea_ice/

Этими данными стали среднемесячные значения концентрации льда (%) в районе от 66.5°с.ш. до 89.5°с.ш. и 20.5°в.д. до 168.5° з.д. за период времени январь 1982 – декабрь 2018гг. (сетка 1°x1°).

2.2 Статистические методы исследования

В работе были использованы такие статистические методы исследования как, выделение тренда и проверка его на значимость и спектр.

Для полного понимания и упрощения анализа данные представлены графически при помощи таких программ как Statistica, Surfer и Ocean Data View 4.

2.2.1 Анализ временного тренда

Существует несколько понятий тренда.

Тренд – это наличие у исследуемого ряда данных тенденции изменения во времени.

Главным требованием к временному ряду – это неизменность его основных статистических характеристик во времени, иными словами стационарность ряда. Для начала оценивается нестационарность временного ряда и если она выявляется, ряд преобразовывают к стационарному виду.

Если у исследуемой характеристики появляется тенденция ее изменения во времени, то можно сказать, что этот ряд имеет тренд.

Приведем более точное определение: тренд отражает наличие в генеральной совокупности исследуемой характеристики длиннопериодного колебания с периодом, значительно превышающим длину выборки.

Существует линейный тренд и нелинейный (квадратичный) тренд.

Рассмотрим уравнение линейного тренда:

$$y = a_1 t + a_0 ,$$

где y – исследуемая характеристика,

t – время.

Теперь рассмотрим уравнение квадратичного (или нелинейного) тренда:

$$y = a_2 t^2 + a_1 t + a_0,$$

где t – время,

y – исследуемая характеристика.

Главными свойствами тренда являются:

1. Вклад в общую дисперсию ряда, который определяется по коэффициенту детерминации R^2 . Если R^2 значим, то тренд есть – вклад значительный. Если нет, то тренда нет – вклад незначительный. Проверка на значимость – определение значимости коэффициента корреляции R_s помощью критерия Стьюдента;

2. Величина тренда – изменение характеристики по линейному тренду за определенный промежуток времени. Определяется из уравнения тренда и соответствует коэффициенту a_1 . [14];

Проверка тренда на значимость осуществляется с помощью оценки на значимость коэффициента регрессии a . В основе этой оценки лежит проверка нулевой гипотезы $H_0: a=0$; при ее альтернативной гипотезе $H_1: a \neq 0$. Для этого рассчитываем критерий Стьюдента для каждого ряда данных, пользуясь следующей формулой:

$$t_a^* = \frac{a}{\sigma_a} \text{ при } \sigma_a = \frac{\sigma_y (1-R^2)}{\sigma_x \sqrt{N-1}},$$

где σ_a – стандартная случайная погрешность коэффициента a ;

R – коэффициент корреляции (сплочённость льда и время);

σ_y, σ_x – стандартное отклонение зависимой (сплочённость льда) и независимой переменной (время);

N – длина ряда, равна 35.

Значение критического коэффициента Стьюдента рассчитывается как $t_{кр}(\alpha, \nu) = 2,03$ определяется по уровню значимости α (принимается равным 5%) и

числу степеней свободы $\nu=N-1$, где $N = 35$ –длина ряда. При сравнении t^* по модулю с $t_{кр}$ были выявлены точки, где значим или незначим коэффициент регрессии, а по этому уже делается вывод о значимости тренда. Если коэффициент значим, то и тренд значим, и наоборот. [14]

Значимость трендов выполнялось при помощи проверки на значимость коэффициента корреляции R исходного ряда с рядом времени. Для этого пользуются критерием Стьюдента. Расчетное значение необходимо рассчитывать по формуле:

$$t^* = \frac{R}{\sigma_R}, \sigma_R = \frac{1-R^2}{\sqrt{N}} - 1,$$

где σ_R – стандартное отклонение коэффициента корреляции

R – коэффициент корреляции,

N – длина ряда, равна 35

Значение критического коэффициента Стьюдента рассчитывается как $t_{кр}(\alpha, \nu) = 2,03$ определяется по уровню значимости α (принимается равным 5%) и числу степеней свободы $\nu=N-1$, где $N = 35$ –длина ряда. Далее сравнивается рассчитанное значение с критическим и делается вывод о значимости R и, в дальнейшем, о значимости тренда[14].

От значимых трендов необходимо избавиться путем вычитания трендовой составляющей из исходного ряда. Дальнейшую работу и анализ целесообразно осуществлять с рядом без тренда.

2.2.2 Спектральный и гармонический анализ

Для выявления циклических составляющих в исследуемом процессе мы воспользуемся спектральным и гармоническим анализом. Данный анализа основан на том, что мы можем разложить абсолютно любой ряд, в ряд Фурье, который представляет собой полную совокупность гармоник. При этом сама гармоника представлена тригонометрической функцией, которая имеет период, кратный длине ряда. [14]

Уравнение гармоника:

$$G_k = A_k \cos(\omega_k t - \varphi_k), \omega_k = 2\pi/T_k,$$

Где k – номер гармоника

A_k – амплитуда k -той гармоника

ω_k – частота

T_k – период

Φ_k – фаза

t – время

По коэффициентам Фурье a_k и b_k определяются такие характеристики гармоника как:

- амплитуда гармоника A_k ;
- фаза гармоника φ_k ;
- дисперсия гармоника D_k ;
- вклад гармоника в общую дисперсию ряда V_k , который является аналогом коэффициента детерминации R^2 . Значит, вклад может быть проверен на значимость. Проверка выявляет значимость гармоника или незначимость вклада в дисперсию ряда.[14].

3 Исследование временной изменчивости характеристик ледовитости вдоль трассы Северного морского пути

3.1 Среднее многолетнее состояние ледовитости арктических морей и Северного Ледовитого океана

Данные представляли собой сетку 1° на 1° , в которую входили данные о концентрации льда в процентах. Помимо этого, так как в эту сетку входили ещё и данные суши, которые отмечались значением 122, от них нужно было избавиться. Для этого в программе Excel, эти значения были заменены на пустые клетки.

На следующем шаге, была рассчитана площадь занятая льдом, то есть средневзвешенное значение количества льда – средневзвешенная ледовитость, которая высчитывалась в процентах [%].

Затем, из всей сетки данных, было выделены примерные границы арктических морей и СЛО (районы), указанные на рисунке 3.1 красными линиями.

Для удобства анализа данные районы были разделены на три группы: западная часть – Баренцево и Карское моря; восточная часть – Восточно-Сибирское, Лавровых и Чукотское моря; северная часть – Северный Ледовитый Океан и весь рассматриваемый район, т.е. СЛО включая арктические моря.

После обработки данных для этих районов были получены среднегодовые значения площади занятой льдом в кв.км, построены графики временной изменчивости исследуемой характеристики за 37 лет (Рисунки 3.2-3.6). На графики нанесен линейный тренд, получены уравнения тренда и значения коэффициента детерминации R^2 .

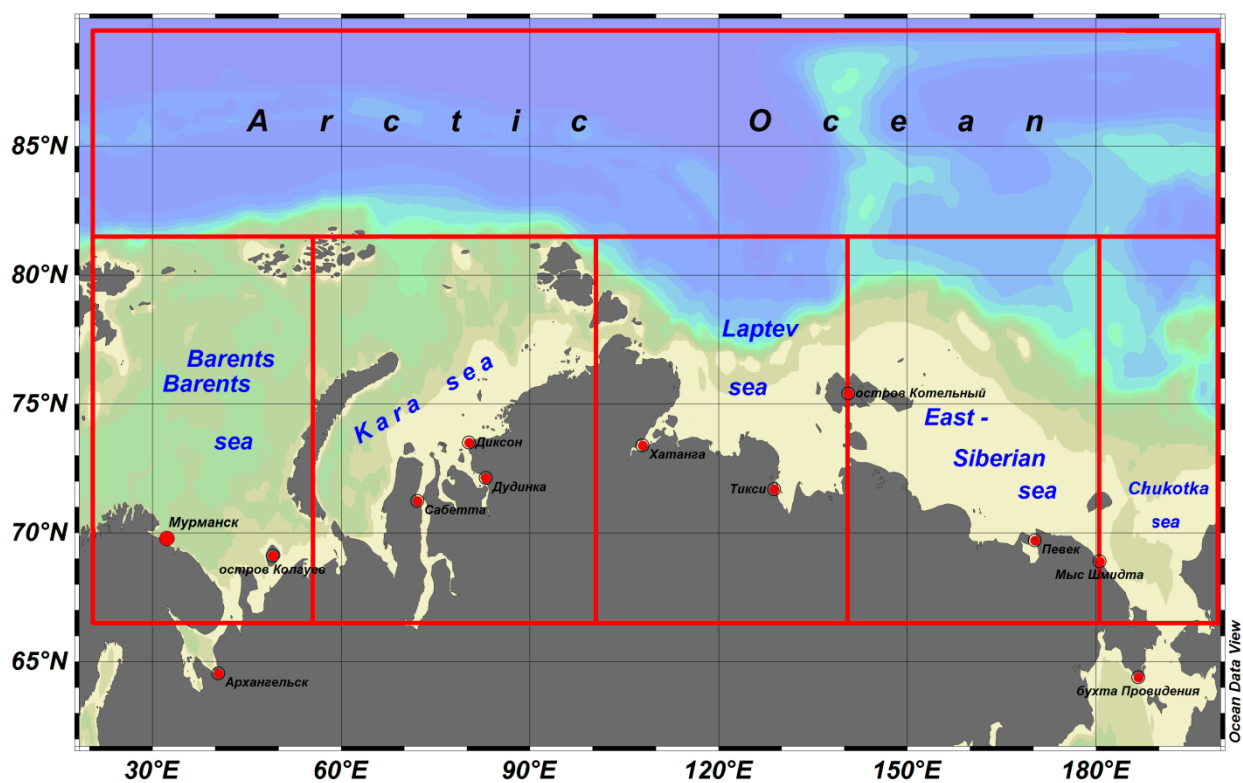


Рисунок 3.1 – Границы арктических морей и Северного Ледовитого океана

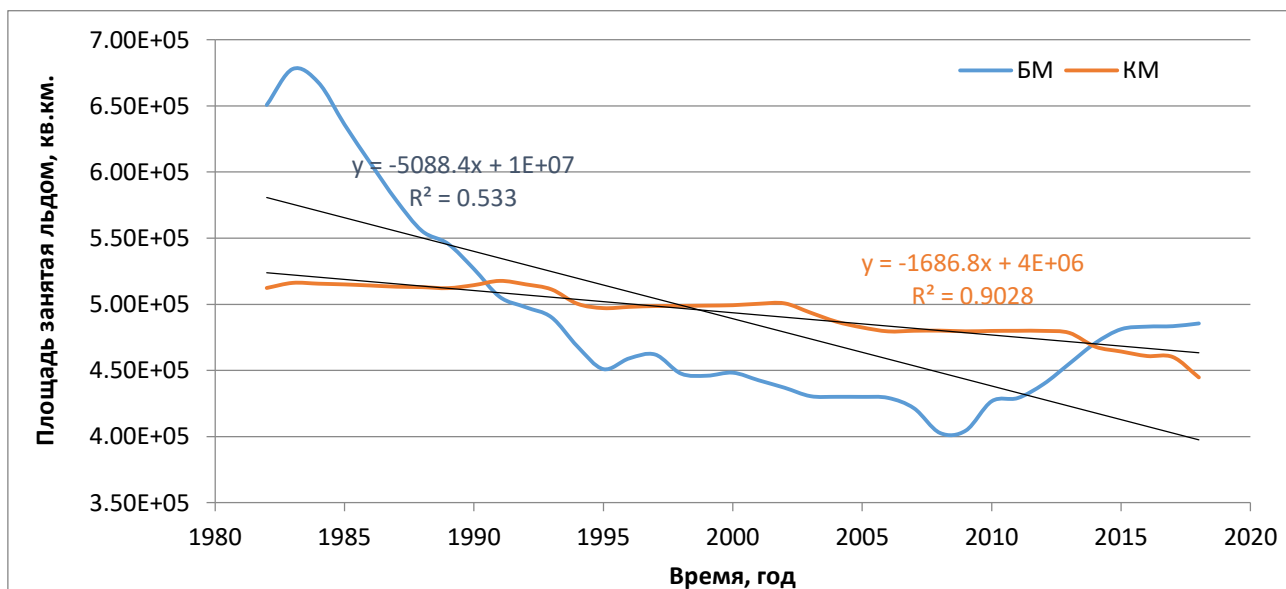


Рисунок 3.2 – Среднегодовой ход изменчивости ледовитости западной части за период с 1982 по 2018 гг.

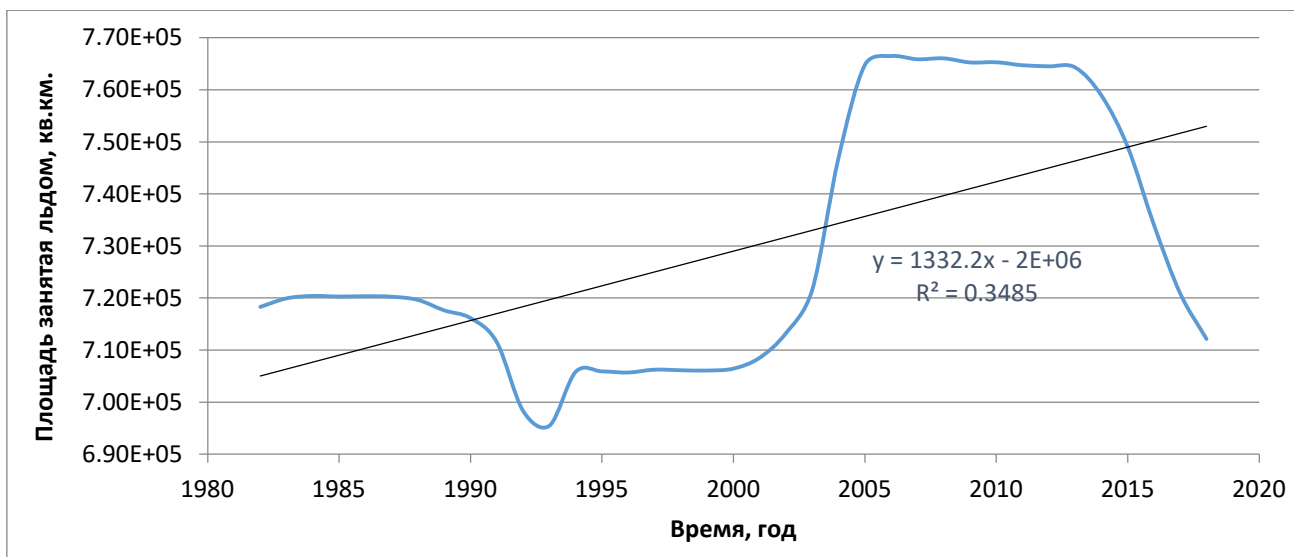


Рисунок 3.3 – Среднегодовой ход изменчивости ледовитости моря Лаптевых за период с 1982 по 2018 гг.

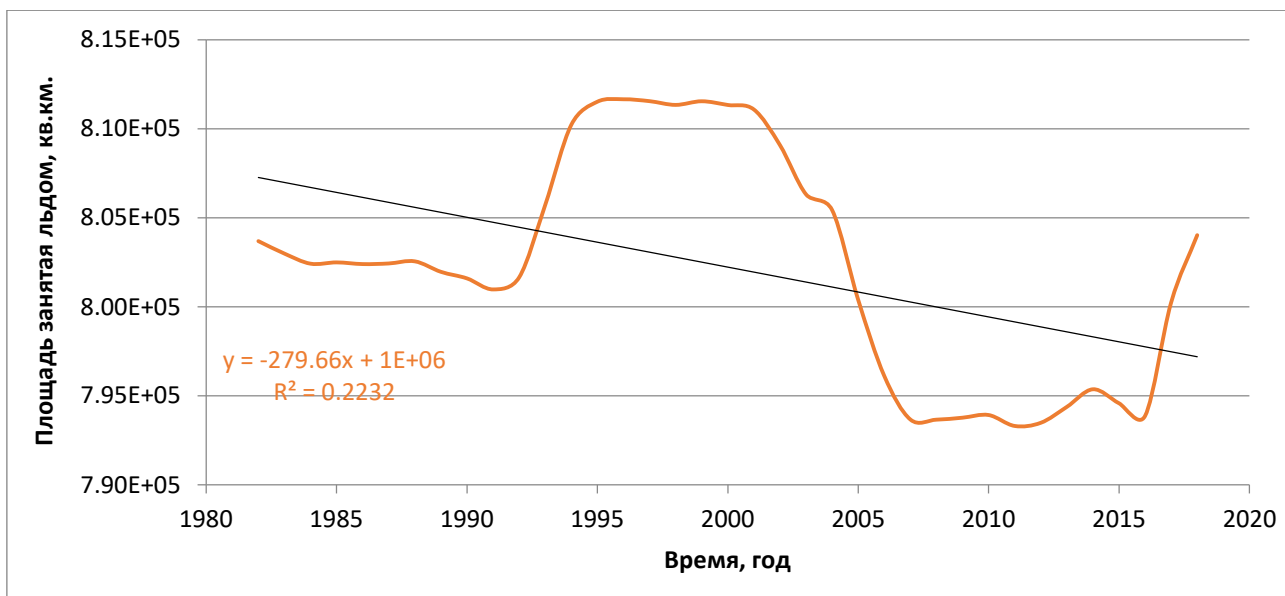


Рисунок 3.4 – Среднегодовой ход изменчивости ледовитости Восточно-Сибирского моря за период с 1982 по 2018 гг.

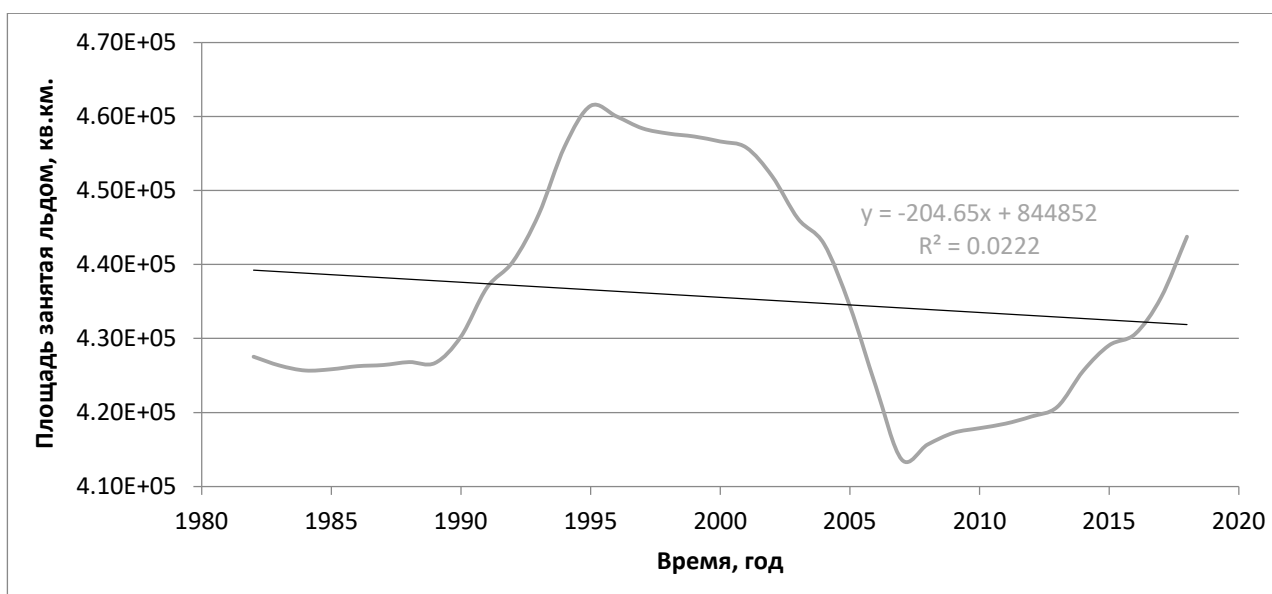


Рисунок 3.5 – Среднегодовой ход изменчивости ледовитости Чукотского моря за период с 1982 по 2018 гг.

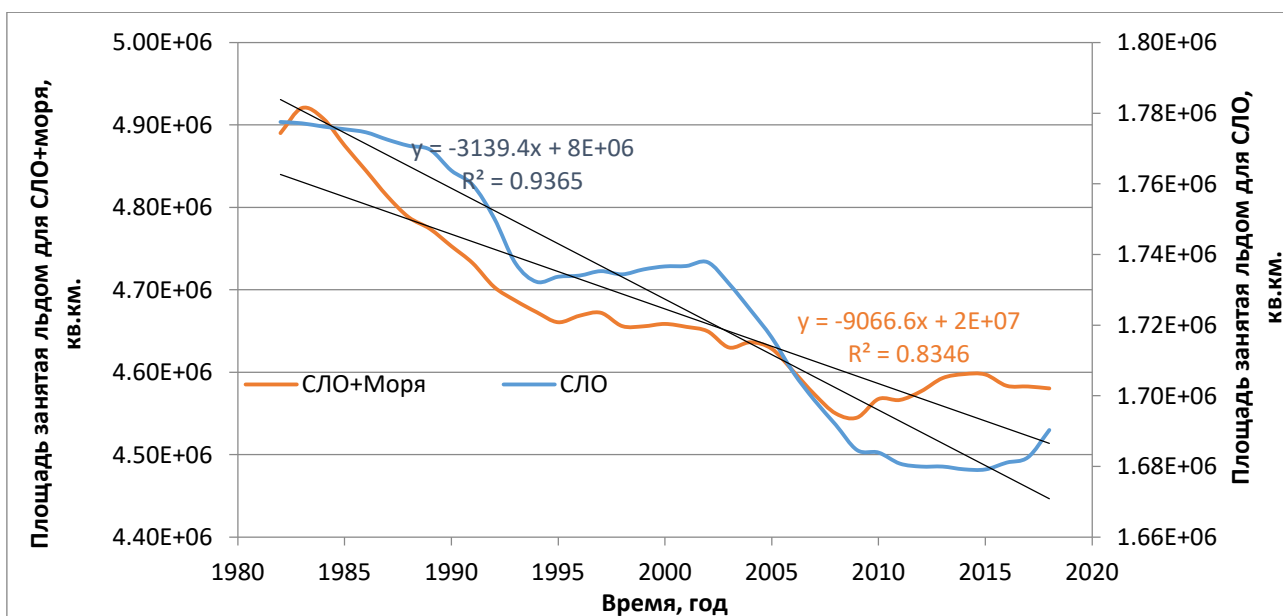


Рисунок 3.6 – Среднегодовой ход изменчивости ледовитости северной части за период с 1982 по 2018 гг.

Коэффициенты регрессии, из уравнений, имеют отрицательный знак - тренд отрицательный – ледовитость уменьшается на всей исследуемой

территории, за исключением моря Лаптевых, где наблюдается рост площади льда.

3.2 Временная изменчивость концентрации льда за март и сентябрь в точках на трассе СМП

Арктика характеризуется ярко выраженным годовым ходом ледяного покрова, амплитуда которого обычно значительно превышает среднегодовые значения. В то же время максимальная концентрации льда наблюдается практически везде в марте, а минимальная - в сентябре. Поэтому на данном этапе рассматриваются особенности межгодовой изменчивости и возможных изменений в текущем столетии максимальной (март) и минимальной (сентябрь) ледовитости в различных точках Арктического региона на трассе Северного морского пути по спутниковым данным за период 1982–2018 гг. Основное внимание уделено анализу линейного тренда, гармоническому анализу Фурье и спектр, а так же представлены оценки выхода на безлёдный режим в исследуемые месяцы на основе экстраполяции линейных трендов за тот же период.

Рассмотрев географическое расположение трассы Северного морского пути, мы выделили 12 точек для анализа концентрации льда морского транспортного коридора (рисунок 3.7).

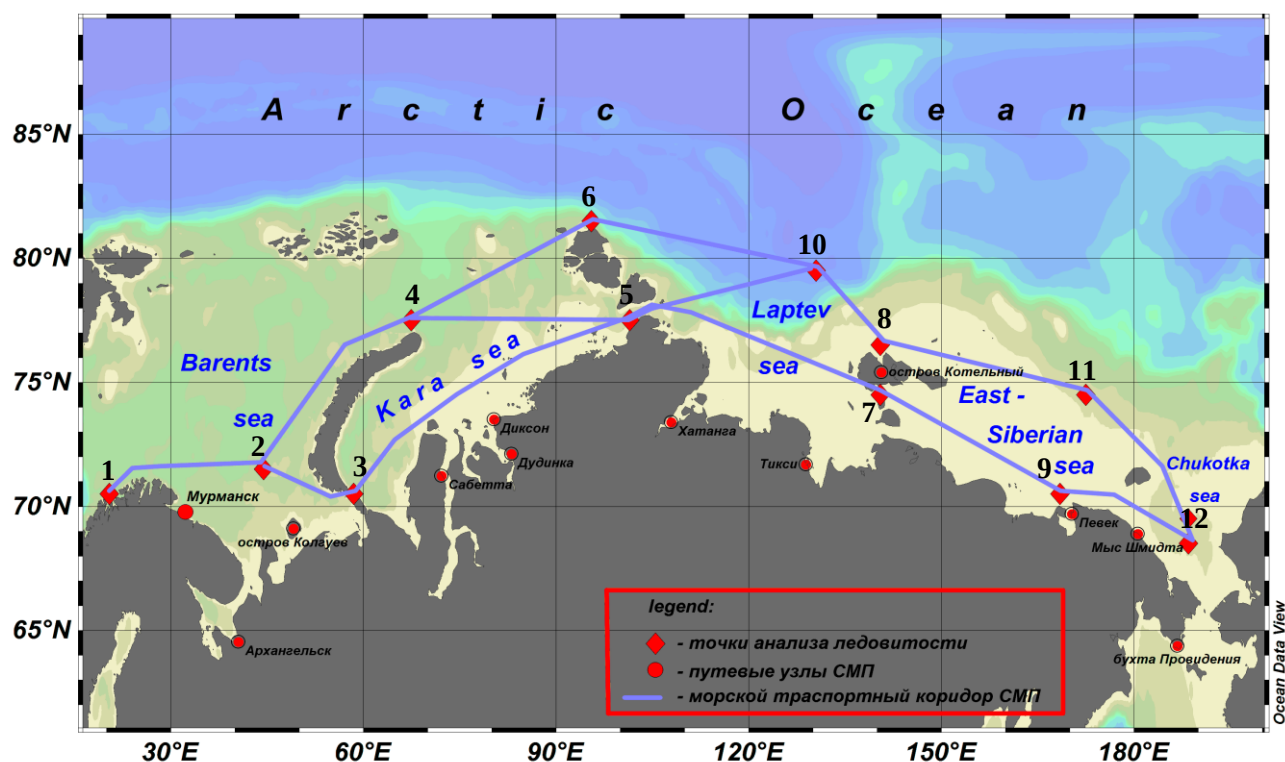


Рисунок 3.7 – Расположение точек для анализа ледовитости на СМП (отмечены красными ромбами).

3.2.1 Анализ трендов в точках на СМП

Для 12 выбранных точек на трассе СМП за март и сентябрь месяц были рассчитаны первичные статистические характеристики концентрации льда за период январь 1982 г. по декабрь 2018 года представленные в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 – Статистические характеристики временной изменчивости концентрации льда за март месяц в период 1982-2018 гг.

Точка	Мин. Март (%)	Макс. Март (%)	Ампл. Март (%)	Ср.зн. Март (%)	Станд. откл. Март	Величина тренда (%/год)
2	0	53	53	4	12.3	-0.10
3	54	98	44	85	10.7	-0.13
4	20	98	78	76	20.2	-0.95
5	87	100	13	94	3.7	-0.18
6	89	100	11	95	3.2	0.07
7	88	100	12	96	2.7	0.02
8	95	100	5	98	1.4	0.03
9	91	100	9	98	2.3	-0.05
10	98	100	2	99	0.8	0.02
11	98	100	2	99	0.6	0.01
12	91	100	9	98	1.8	0.04

Таблица 2 – Статистические характеристики временной изменчивости концентрации льда за сентябрь месяц в период 1982-2018гг.

Точка	Мин. Сент. (%)	Макс. Сент. (%)	Ампл. Сент. (%)	Ср.зн. Сент. (%)	Станд. откл. Сент.	Величина тренда (%/год)
2	0	0	0	0	0	0
3	0	49	49	1	8	0
4	0	11	11	1	3	-0.05
5	0	84	84	34	24	-0.65
6	0	93	93	54	32	-1.52
7	0	70	70	7	14	-0.12
8	0	84	84	12	22	-0.75
9	0	80	80	14	25	-1.40
10	0	95	95	57	40	-2.07
11	0	100	100	59	38	-2.57
12	0	0	0	0	0	0

Рассмотрим карту (Рисунок 3.8), на которой изображены средние многолетние значения концентрации льда за март месяц (подписаны выше точек) и стандартное отклонение (подписано ниже точек). На данной карте видно, что на всей трассе СМП наблюдается достаточно высокая концентрация льда от 76 до 98 процентов, за исключением точки в Баренцевом море, где она составляет всего 4%. Также, стоит отметить, что наибольшая концентрация льда наблюдается в восточной части Арктики (море Лаптевых, Восточно-Сибирское и чукотское моря). Стандартное отклонение показывает, что в восточной части средние многолетние колебания незначительны и составляют не больше 4%. В западной же части средняя многолетняя изменчивость высокая и составляет от 11 до 20%.

Можно сделать вывод, что в марте месяце на трассе СМП ледовая обстановка практически остаётся не изменой, за исключением Баренцева и Карского морей.

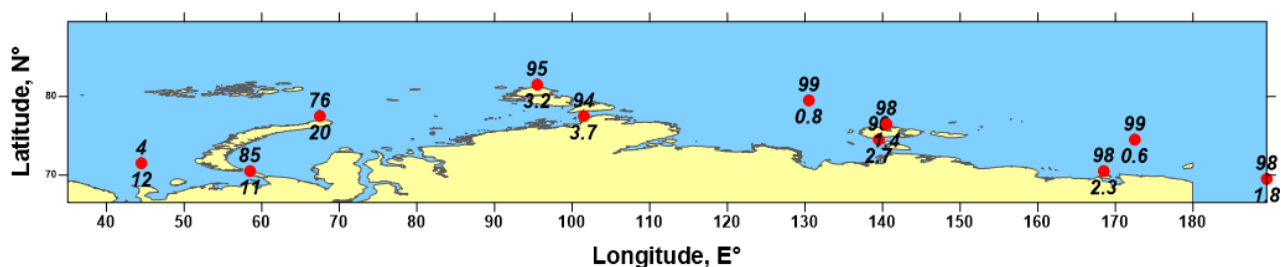


Рисунок 3.8 – Средняя концентрации льда (сверху) и стандартное отклонение (снизу) в марте, за период 1982-2018гг. (%)

В сентябре средняя многолетняя концентрация льда значительно меньше, чем в марте и составляет 0-59% (Рисунок 3.9). Также как и в первом случае выделяется разделение на западную и восточную часть, за исключением точки в Чукотском море, где, как и в западной части на трассе СМП акватория полностью свободна ото льда.

Стандартное отклонение концентрации льда достаточно выше, чем в марте, от 3 до 40%. Опять же, в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море изменчивость выше, чем в западной части и в Чукотском море и составляет от 22 до 40%.

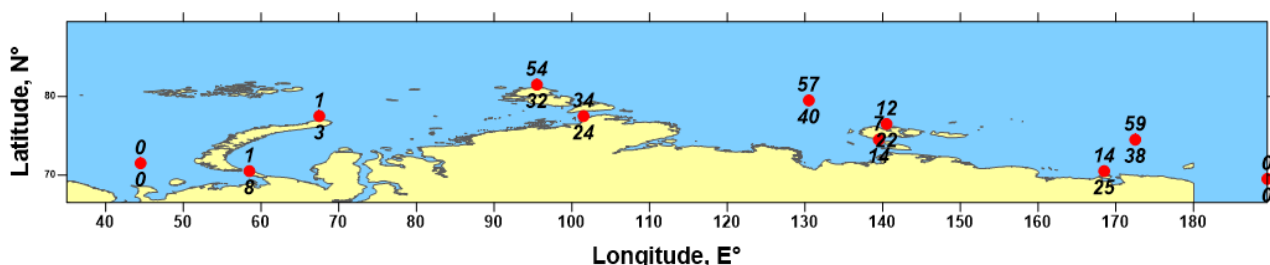


Рисунок 3.9 – Средняя концентрации льда (сверху) и стандартное отклонение (снизу) в сентябре, за период 1982-2018гг. (%)

В общем случае дисперсия межгодовой изменчивости концентрации льда складывается из суммы дисперсий тренда, циклических и случайных компонент. Результаты расчетов показали, в исследуемых рядах проявляются неустойчивые короткопериодные колебания разных периодов, причем они, как правило, не являются одинаковыми для разных регионов. С учетом этого, а также принимая во внимание сравнительно короткую длину временных рядов ледовитости, ограничимся только анализом трендов.

На следующей карте (Рисунок 3.10) для каждой точки СМП за март, приведены значения тренда (сверху), которые отображают тенденцию изменения ледовитости за 1982-2018 год и коэффициент детерминации R^2 (снизу).

На рисунке 3.10 видно, что в западной части Арктики в точках на СМП коэффициенты тренда отрицательные, что говорит нам о том, что ледовитость уменьшается. Максимально уменьшение концентрации льда наблюдается в Карском море у северной оконечности Новой Земли, вблизи мыса Желания и составляет почти 1% в год.

В восточной части наблюдается обратная картина, коэффициенты тренда, положительные, следовательно, происходит увеличение ледовитости в марте.

По оценке коэффициента детерминации R^2 , отнесенные снизу, (Рисунок 3.10) можно сказать, что практически все тренды значимы (при уровне значимости 0,05).

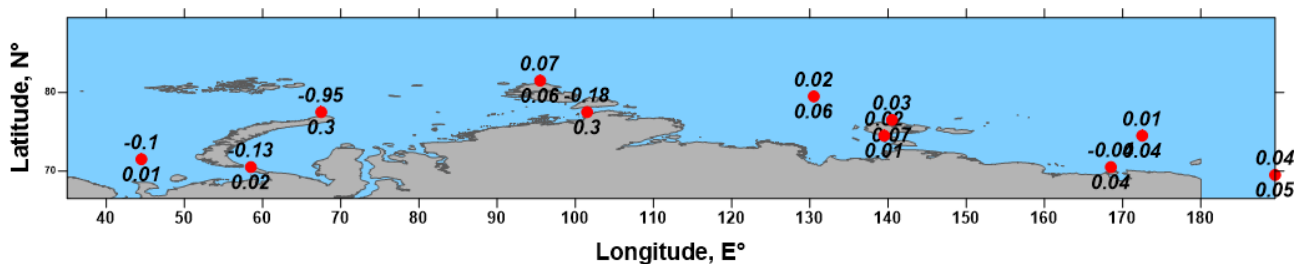


Рисунок 3.10 – Коэффициент тренда (сверху) и коэффициент детерминации R^2 (снизу) в марте, за период с 1982 по 2018.

В сентябре (Рисунок 3.11) коэффициенты тренда на всём исследуемом участке отрицательны, что говорит об уменьшении количества льда. Также R^2 больше чем в марте, что говорит нам о том, что в сентябре количество льда сокращается значительно больше, особенно в восточной части Арктики.

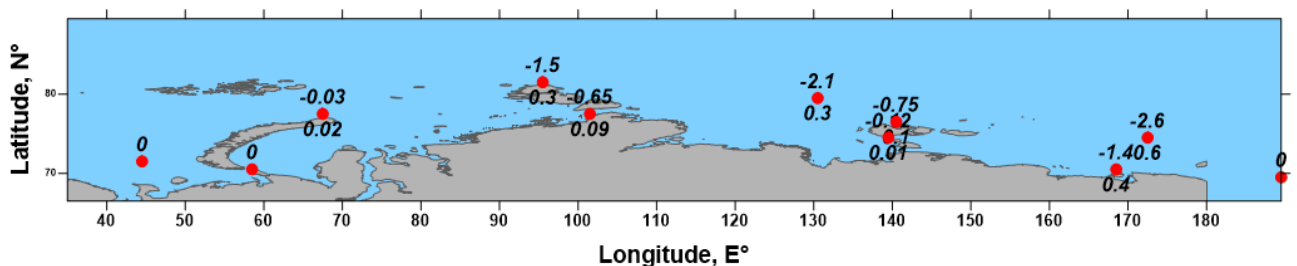


Рисунок 3.11 – Коэффициент тренда (сверху) и коэффициент детерминации R^2 (снизу) в сентябре, за период с 1982 по 2018.

3.2.2 Гармонический анализ Фурье и спектральный анализ концентрации льда в марте и сентябре в точках на СМП

Для спектрального анализа временной изменчивости концентрации льда за март в точках на СМП необходимо выявить только циклические составляющие.

Из исходного ряда был удален линейный тренд. В программе «Статистика» для ряда остатков была рассчитана периодограмма, рисунок спектра (Приложение А и Б соответственно) и ему соответствующая таблица.

По рисунку спектра для каждого года, за март и сентябрь месяц, были определены «пики» периодограммы, им соответствуют максимальные значения периодограммы. Проанализировав все периодограммы в каждой выбранной точке на СМП, было решено выбрать от двух до трёх максимумов. В таблице 3 показаны получившиеся периоды основных гармоник в марте и сентябре.

Таблица 3 – Периодограмма среднегодового ряда отклонений значений ледовитости от тренда для марта и сентября месяца.

Точка	Широта, N°	Долгота, E°	Март			Сентябрь	
2	71.5	44.5	-	-	-	-	-
3	70.5	58.5	3	-	-	-	-
4	77.5	67.5	5	3	2.4	-	-
5	77.5	101.5	9	-	-	-	-
6	81.5	95.5	-	-	-	2.8	-
7	74.5	139.5	9	-	-	9	-
8	76.5	140.5	5	-	-	4	-
9	70.5	168.5	4	3	-	4	3
10	79.5	130.5	6	-	-	6	3.6
11	74.5	172.5	5	3	-	5.1	4
12	69.5	189.5	6	2	-	3.6	-

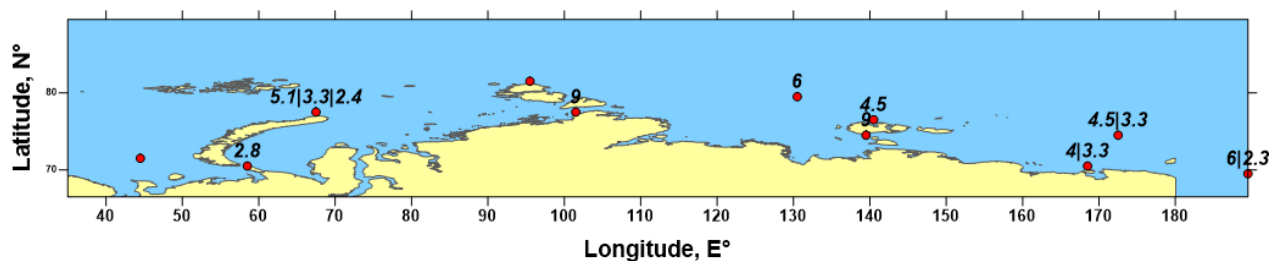


Рисунок 3.12 – Распределение периодов (год) основных гармоник в точках на СМП в марте, за период 1982-2018гг.

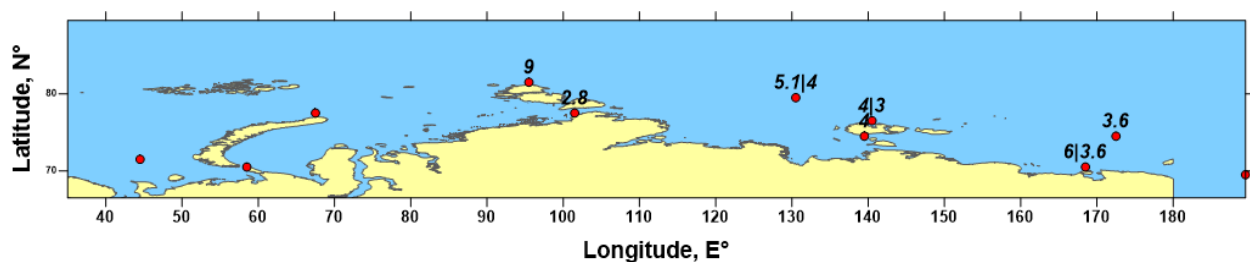


Рисунок 3.13 – Распределение периодов (год) основных гармоник в точках на СМП в сентябре, за период 1982-2018гг.

В приложение В представлены характеристики гармоник, рассчитанных для каждого периода.

Вклад гармоник в общую дисперсию ряда (V) по сути, является аналогом коэффициента детерминации (r^2), что позволяет нам оценить гармоники на значимость. Оценка проводится с помощью критерия Стьюдента, критическое значение рассчитано при уровне значимости $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы $\nu=35$. Проверив каждую гармонику выбрали из них значимые ($t^* > t_{кр}$) периоды, которые представлены в таблице (красным отмечены незначимые гармоники) для марта и для сентября (Приложение В, Г соответственно).

По гармоникам был восстановлен ряд отклонений ряда концентрации льда, как сумма значимых гармоник. Построен совмещенный график исходных и восстановленных значений за март и сентябрь (Приложение Д, Е соответственно). Восстановленные значения практически во всех случаях

отражают общую среднегодовую изменчивость ледяного покрова, но не отражают скачки.

3.2.3 Выход на безлёдный режим в выбранных точках на трассе СМП

Рассмотрим теперь оценки выхода на безлёдный режим в точках СМП в марте и сентябре на основе трендового подхода. Для расчёта выхода на безлёдный режим мы использовали уравнения тренда полученные для каждой точки, по данным концентрации льда (%) с 1982 по 2018 год (Приложение Ж, 3). В таблице 4 приводятся годы выхода на безледный режим для различных точек и уравнения тренда.

Для расчёта выхода на безлёдный режим уравнения тренда были приравнены нулю и получены значения свободных членов для каждой точки, по которым были рассчитаны года выхода на ноль (безлёдный режим).

На рисунке 3.14 изображены карты с выходом на безлёдный режим в точках СМП март и сентябре соответственно. Из таблицы 3 по величине тренда и рассчитанным по уравнению тренда выход на ноль видно, что сокращение концентрации льда в марте и сентябре происходит существенно разными темпами.

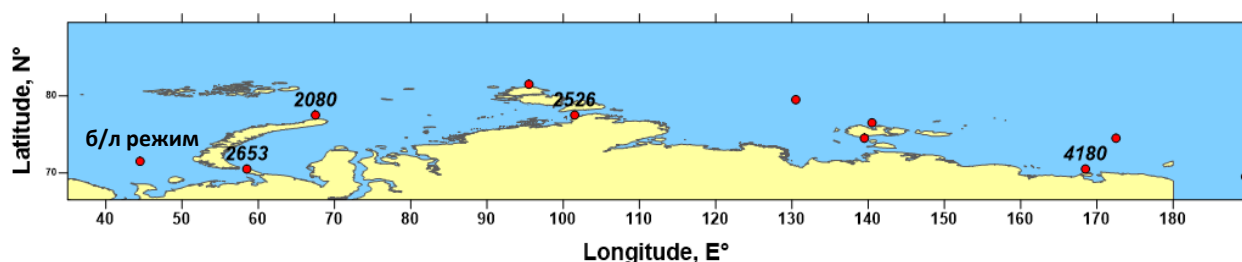


Рисунок 3.14 – Карта точек СМП с выходом на безлёдный режим в марте.

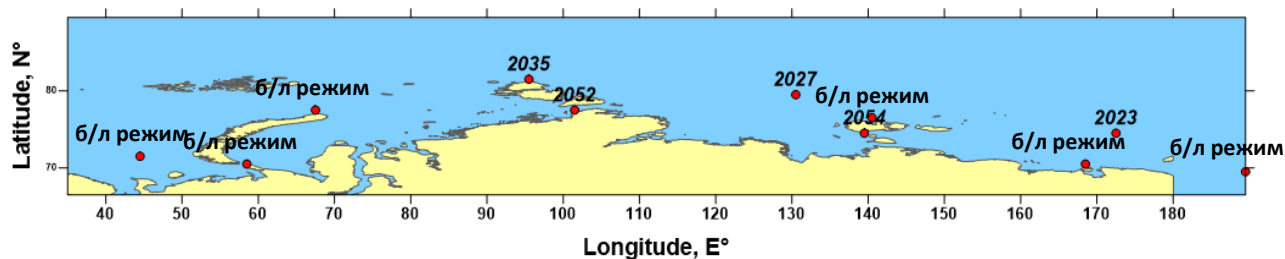


Рисунок 3.15 – Карта точек СМП с выходом на безлёдный режим в сентябре.

Таблица 3 – Оценки выхода на начальный год безлёдного режима ледовитости в выбранных точках СМП на основе линейного тренда.

Точка	Март			Сентябрь		
	Уравнение тренда ледовитости	Величина тренда (%/год)	Выход на безлёдный режим	Уравнение тренда ледовитости	Величина тренда (%/год)	Выход на безлёдный режим
2	$y = -0.1041x + 6.2477$	-0.10	б/л режим	-	0	б/л режим
3	$y = -0.1309x + 87.973$	-0.13	2653	-	0	б/л режим
4	$y = -0.9483x + 94.153$	-0.95	2080	-	-0.03	б/л режим
5	$y = -0.1788x + 97.532$	-0.18	2526	$y = -0.6534x + 46.171$	-0.65	2052
6	$y = 0.0735x + 93.712$	0.07	-	$y = -1.5242x + 83.014$	-1.52	2035
7	$y = 0.0185x + 95.568$	0.02	-	$y = -0.1226x + 8.9505$	-0.12	2054
8	$y = 0.0339x + 97.167$	0.03	-	$y = -0.7482x + 26.459$	-0.75	2016
9	$y = -0.0448x + 98.5$	-0.04	4180	$y = -1.3966x + 40.05$	-1.40	2010
10	$y = 0.0164x + 98.905$	0.02	-	$y = -2.0742x + 96.329$	-2.07	2027
11	$y = 0.0114x + 99.054$	0.01	-	$y = -2.5716x + 107.45$	-2.57	2023
12	$y = 0.0375x + 97.477$	0.04	-	-	0	б/л режим

Если в марте самый ближайший выход на безледный режим наблюдается в точке Карского моря у мыса Желаний и может произойти по уравнению тренда (Рисунок 3.16) в 2080 году, то в сентябре там уже льда не наблюдается. В остальных же точках марте месяце выход на безлёдный режим не раньше 2526 года (Рисунок 3.14).

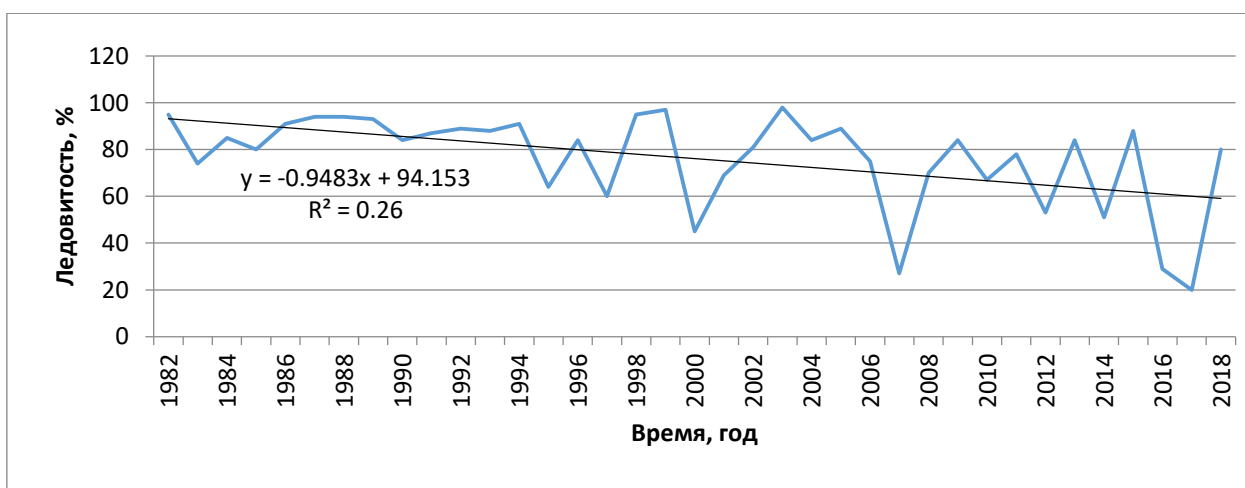


Рисунок 3.16 – Временная изменчивость концентрации льда в Точке 4 (мыс Желания, Карское море) в марте, за период 1982-2018 гг.

Величина линейного тренда в сентябре во много раз выше, чем в марте. Также в сентябре площадь морских льдов стремительно сокращается со средней скоростью на всём рассматриваемом участке Северного морского пути, примерно 10% в десятилетие. Выход на безлёдный режим наблюдается уже в настоящее время в 6 точках из 11 выбранных (Рисунок 3.15) – это западная часть (Баренцево и Карское моря) и точка в Чукотском море. В оставшихся 5 точках, по полученным расчётам, самый поздний выход на безлёдный режим в точке у Новосибирских островов, пролив Санникова в 2054 году. Самый быстрый выход на ноль в восточной части Восточно-Сибирского моря в 2023 году – точка 11. Из рисунка видно, что формирование отрицательного тренда в сентябре вызвано главным образом периодом 1995-2012 гг. (Рисунок 3.17), когда отмечалось ускоренное уменьшение площади морского льда.

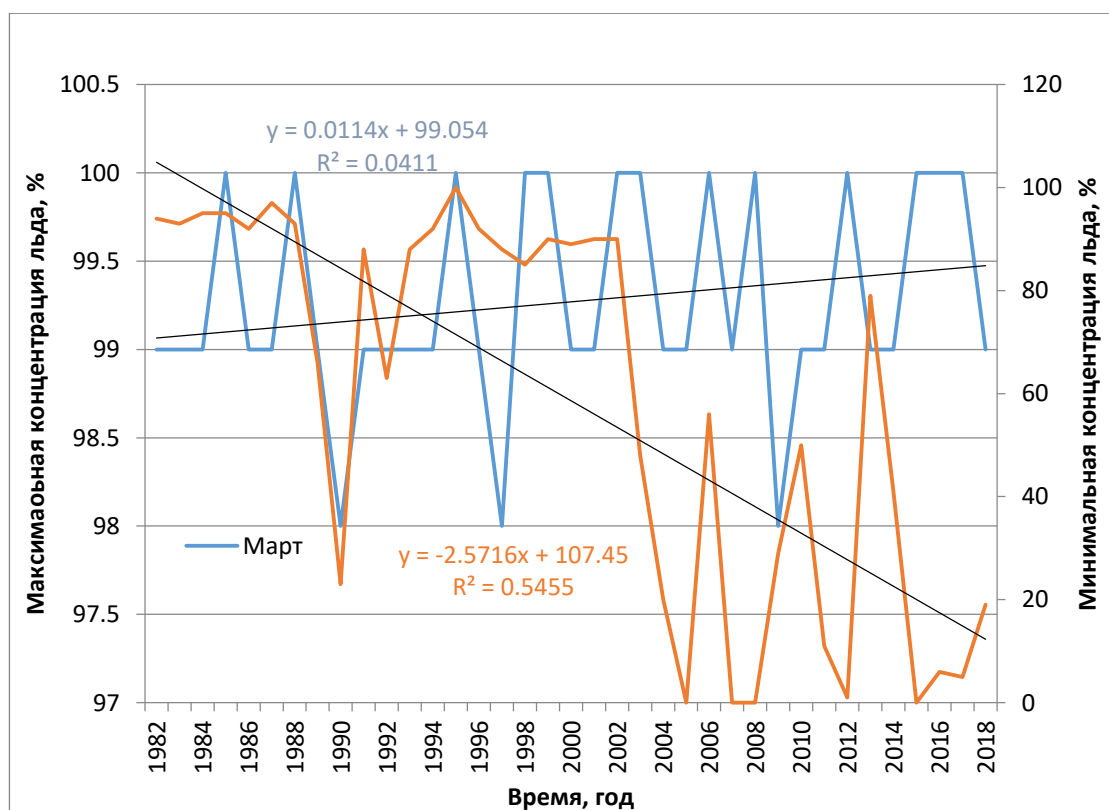


Рисунок 3.17 – Межгодовой ход минимальной (сентябрьской) и максимальной (мартовской) концентрации льда (%), в точке 11 (Восточно-Сибирское море) за 1982–2018 гг.

Заключение

В результате выполненных расчетов в данной работе получены следующие основные выводы.

Рассмотрены особенности межгодовой изменчивости и возможных изменений в текущем столетии максимальной (март) и минимальной (сентябрь) концентрации льда в реперных точках вдоль трассы Северного морского пути за период 1982-2018 года.

С помощью гармонического и спектрального анализов выявлено, что в исследуемых рядах концентрации льда в точках на СМП присутствуют неустойчивые короткопериодные колебания разных периодов, причем они не являются одинаковыми для разных регионов. В марте в западной части отмечается наличие 9, 5, 3, 2 летних циклов, а в восточной части выделяются 9, 6, 4, 3 и 2 летние циклы. А в сентябре были выявлены 9, 6, 5, 4 и 3 летние циклы для восточной части, для западной части циклов выявлено небыло.

В марте в восточной части Арктики – это море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря, ледовая обстановка остаётся неизменной и акватория плотно занята льдом. А в западной части, в Карском и Баренцевом море, средняя изменчивость ледовитости достаточно высокая и концентрация льда меньше.

В сентябре, акватория Северного морского пути более открыта ото льда, причём в западной части Арктики и в Чукотском море, акватория полностью свободна ото льда. В сентябре ледовитость моря Лаптевых и в Восточно-Сибирского моря меньше, чем в марте, а изменчивость выше.

При анализе трендов среднемесячных значений ледовитости для каждой точки трассы СМП за март показал, что в восточной части российской Арктики происходит увеличение ледовитости, а в западной наблюдается уменьшение,

особенно в северной части Карского моря. В сентябре количество льда уменьшается на всей акватории вдоль трассы СМП.

Также в данной работе представлены оценки выхода на безледный режим в марте и сентябре на основе расчёта по линейному тренду за период 1982–2018 гг. В марте выход на безледный режим в ближайшие сто лет наблюдается только в точке Карского моря у мыса Желаний – это 2080 год, в остальных же точках СМП выхода на безледный режим нет. В выбранных точках за сентябрь в Баренцевом, Карском и Чукотском море безледный режим наблюдается уже в настоящее время. Затем, быстрее всего очищение от морского льда по линейному тренду может произойти в точке Восточно-Сибирского моря в 2023 году, затем в море Лаптевых в 2027 году. Дольше всех – режим в точке у Новосибирских островов, пролив Санникова в 2054 году.

Таким образом, можно предположить, что в сентябре практически на всех выбранных точках вдоль трассы СМП, ледовая обстановка наиболее благоприятная для судоходства и будет улучшаться практически на всём пути следования по Северному морскому пути при сохранении настоящей тенденции, то есть возможно увеличение сезона навигации. Но при этом остаются зоны с очень сплочённым льдом, что является проблемой для прохождения судов данным транспортным коридором. Следовательно, ледокольное обеспечение сохранится для судоходства по Северному морскому пути и для работ, которые проводятся на шельфе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Северный морской путь – главная транспортная артерия России // БУДУЩЕЕ АРКТИКИ.РФ URL: <https://будущее-арктики.рф/severnyj-morskoj-put-glavnaya-transportnaya-arteriya-rossii/> (дата обращения: 26.04.2019).
2. Kinnard C., Zdanowicz C.M., Fisher D.A., Isaksson E., de Vernal A., Thompson L.G. Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years // Nature. 2011. V. 479. P. 509–512.
3. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50–65.
4. Global Temperature Report for 2018 // Berkeley Earth URL: <http://berkeleyearth.org/category/uncategorized/> (дата обращения: 27.04.2019).
5. БАРЕНЦЕВО МОРЕ // URL: http://www.aari.ru/resources/a0013_17/barents/atlas_barents_sea/_Atlas_Barents_Sea_seasons/text/Barenc.htm#2p6.7 (дата обращения: 27.04.2019).
6. А.Д. Добровольский, Б.С. Залогин. Моря СССР "Природа и хозяйство". Москва: Мысль, 1965 г.. 350 с.
7. Карское море // URL: http://www.aari.ru/resources/a0013_17/kara/Atlas_Kara_Sea_Winter/text/rejim.htm#p9 (дата обращения: 28.04.2018).
8. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. - М: МГУ, 1982. - С. 113-123.
9. Информация об арктических морях // URL: http://www.aari.ru/projects/ECIMOt/Docs/reports/21/html/page_2.html (дата обращения: 28.04.2018).

10. Общее климатическое описание региона // ЭРСП по гидрометеорологическому режиму Восточно-Сибирского моря URL: http://nodc.meteo.ru/ERSP/atlaseastsiberian/opis_reg.html (дата обращения: 28.04.2018).
11. Моря России — Восточно-Сибирское море // География URL: <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-vostochno-sibirskoe-more/> (дата обращения: 28.04.2018).
12. Моря России — Чукотское море // География URL: <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-chukotskoe-more/> (дата обращения: 28.04.2018).
13. Чукотское море // База знаний URL: http://proznania.ru/?page_id=2358 (дата обращения: 28.04.2018).
14. Гордеева С.М Практикум по дисциплине "Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации". - СПб.: РГГМУ, 2010. – 45-48 с
15. Океаны, озёра и реки // URL: www.factruz.ru/world_ocean_2/ (дата обращения: 28.04.2018).

Приложение А – Спектры разложения Фурье за март 1982-2018 гг.

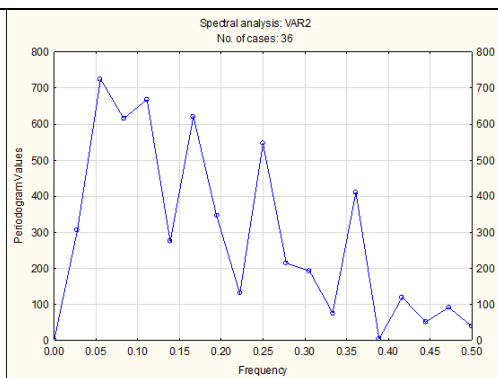


Рисунок А.1 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 2

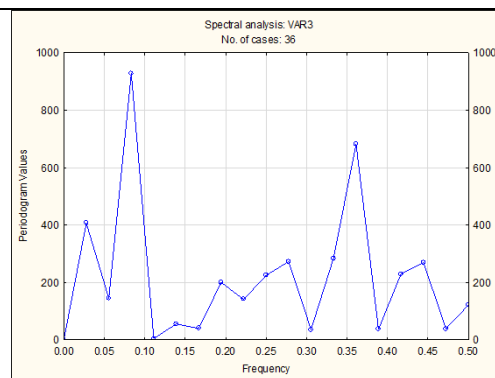


Рисунок А.2 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 3

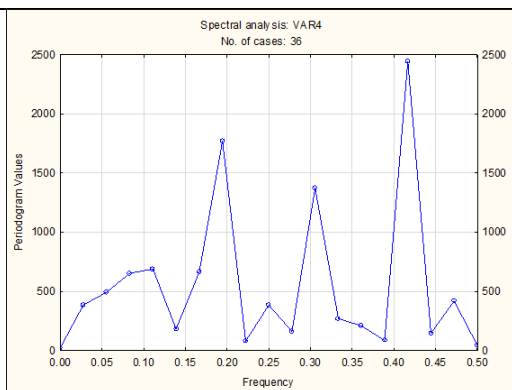


Рисунок А.3 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 4

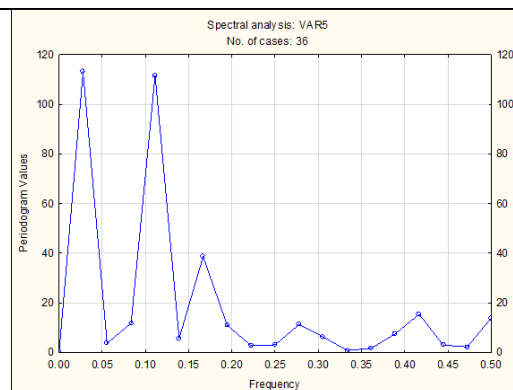


Рисунок А.4 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 5

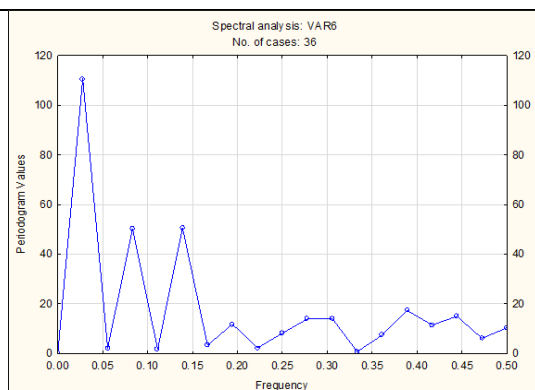


Рисунок А.5 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 6

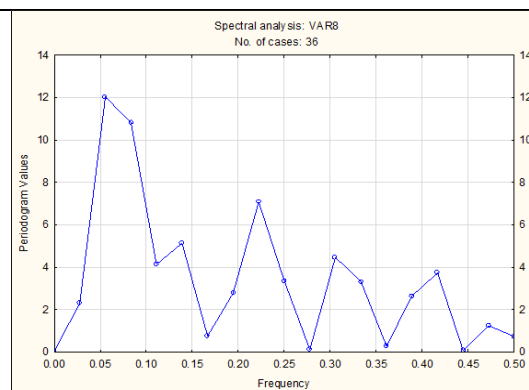


Рисунок А.6 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 7

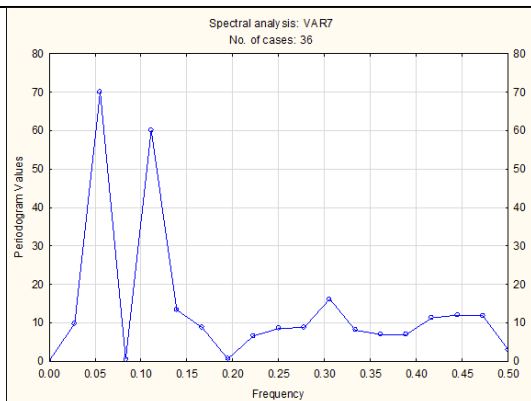


Рисунок А.7 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 8

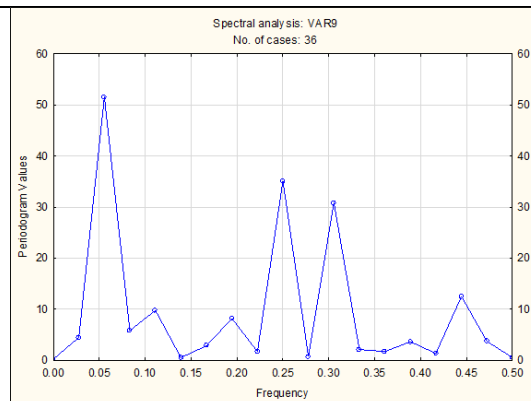


Рисунок А.8 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 9

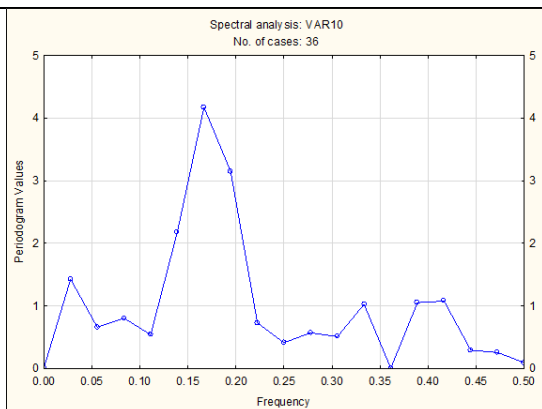


Рисунок А.9 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 10

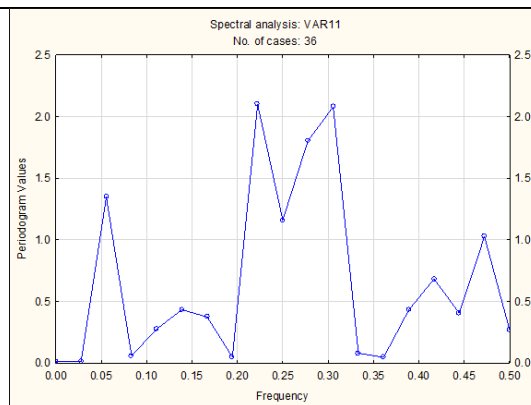


Рисунок А.10 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 11

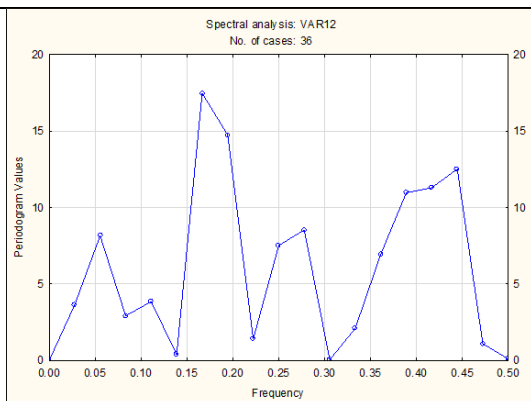


Рисунок А.11 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 12

Приложение Б – Спектры разложения Фурье за сентябрь 1982-2018 гг.

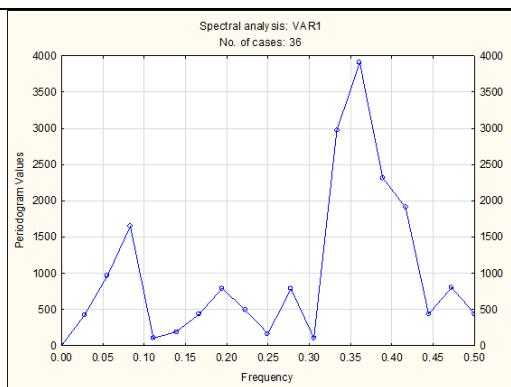


Рисунок Б.1 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 5

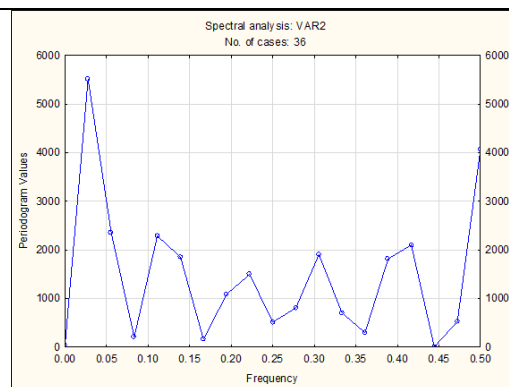


Рисунок Б.2 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 6

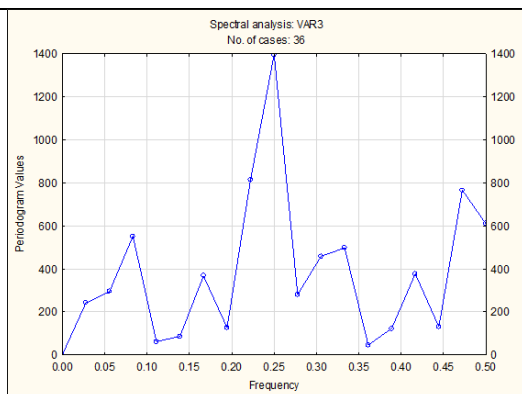


Рисунок Б.3 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 7

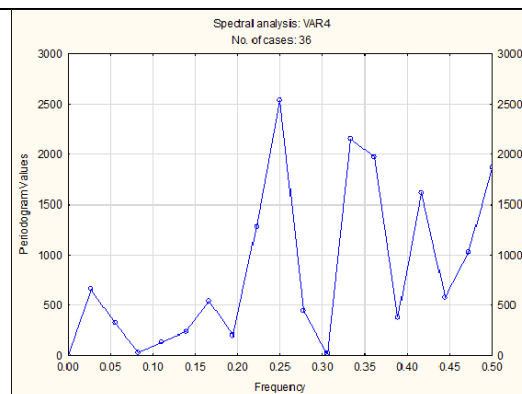


Рисунок Б.4 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 8

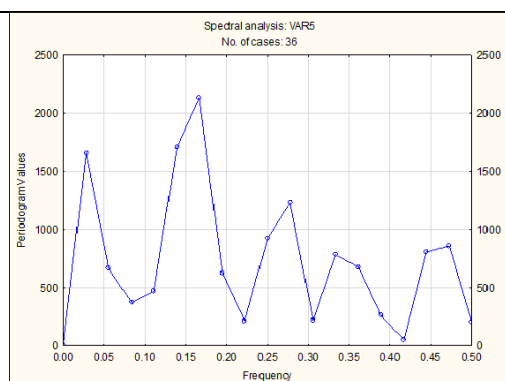


Рисунок Б.5 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 9

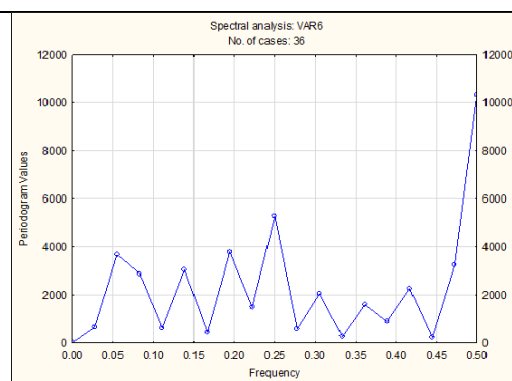


Рисунок Б.6 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 10

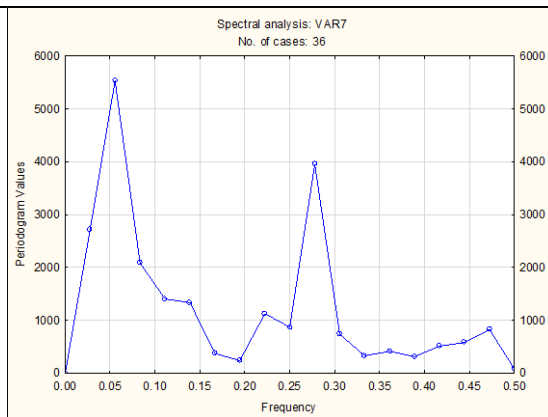


Рисунок Б.7 – Периодограмма для
ряда отклонений рядов концентрации
льда в точке 11

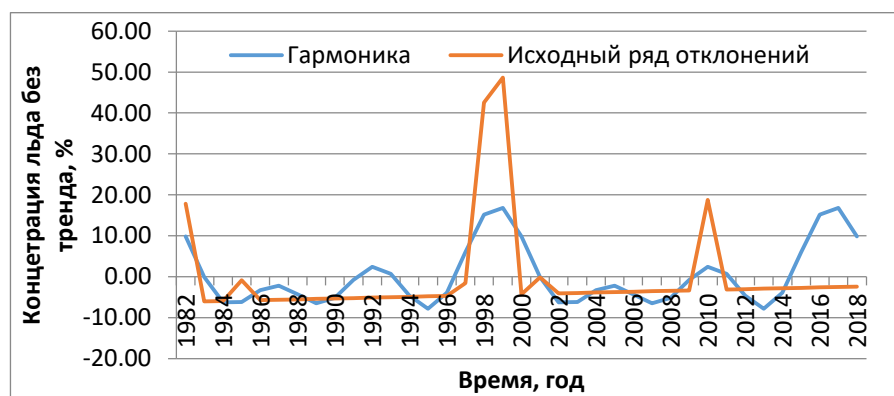
Приложение В – Таблица характеристик гармоник в марте за период с 1982 по 2018 гг.

Точка	Период	Коэффициент Фурье ак, °C	Коэффициент Фурье bk, °C	Амплитуда A, °C	Фаза φ	Дисперсия D, °C ²	Вклад гармоники в общую дисперсию ряда	V (r ²)	r	σ _r	t*	ткр
2	18.0	-1.51	5.88	6.07	-0.25	18.40	0.12	0.12	0.35	0.15	2.36	2.03
	9.0	0.16	5.83	5.83	0.03	16.98	0.11	0.11	0.34	0.15	2.24	2.03
	6.0	-2.58	5.09	5.71	-0.47	16.29	0.11	0.11	0.33	0.15	2.19	2.03
3	12.0	-3.67	-5.77	6.83	0.57	23.34	0.21	0.21	0.45	0.13	3.39	2.03
	2.8	-1.99	-5.71	6.04	0.34	18.26	0.16	0.16	0.40	0.14	2.84	2.03
4	5.1	5.81	-8.02	9.90	-0.63	49.01	0.16	0.16	0.40	0.14	2.84	2.03
	3.3	5.18	-7.83	9.38	-0.58	44.02	0.15	0.15	0.38	0.14	2.64	2.03
	2.4	10.89	-5.66	12.27	-1.09	75.30	0.25	0.25	0.50	0.13	3.93	2.03
5	36.0	-0.66	-2.29	2.38	0.28	2.83	0.29	0.29	0.53	0.12	4.42	2.03
	9.0	2.30	0.92	2.47	1.19	3.06	0.31	0.31	0.56	0.12	4.75	2.03
6	36.0	-0.24	-2.32	2.33	0.10	2.71	0.29	0.29	0.54	0.12	4.50	2.03
	12.0	-0.43	-1.48	1.54	0.29	1.19	0.13	0.13	0.36	0.15	2.43	2.03
7	18.0	-1.26	1.51	1.97	-0.69	1.93	0.26	0.26	0.51	0.12	4.11	2.03
	9.0	1.77	-0.42	1.82	-1.34	1.65	0.22	0.22	0.47	0.13	3.61	2.03
8	18.0	-0.41	0.66	0.78	-0.56	0.31	0.17	0.17	0.41	0.14	2.93	2.03
	4.5	0.58	-0.10	0.59	-1.40	0.17	0.10	0.10	0.31	0.15	2.03	2.03
9	18.0	-0.61	1.62	1.73	-0.36	1.50	0.30	0.30	0.55	0.12	4.59	2.03
	4.0	-0.52	-1.20	1.31	0.41	0.86	0.17	0.17	0.41	0.14	2.93	2.03
	3.3	0.34	1.21	1.26	0.28	0.79	0.16	0.16	0.40	0.14	2.78	2.03
10	36.0	0.00	-0.25	0.25	0.01	0.03	0.06	0.06	0.24	0.16	1.51	2.03
	6.0	0.24	0.43	0.49	0.51	0.12	0.23	0.23	0.48	0.13	3.64	2.03
11	18.0	0.15	0.19	0.24	0.68	0.03	0.08	0.08	0.29	0.16	1.85	2.03
	4.5	-0.33	0.14	0.35	-1.17	0.06	0.18	0.18	0.42	0.14	3.02	2.03
	3.3	0.27	-0.14	0.31	-1.08	0.05	0.13	0.13	0.36	0.15	2.47	2.03
12	18.0	0.61	0.26	0.66	1.17	0.22	0.07	0.07	0.26	0.16	1.67	2.03
	6.0	-0.87	0.40	0.95	-1.14	0.46	0.14	0.14	0.38	0.14	2.62	2.03
	2.3	0.43	0.69	0.81	0.56	0.33	0.10	0.10	0.32	0.15	2.12	2.03

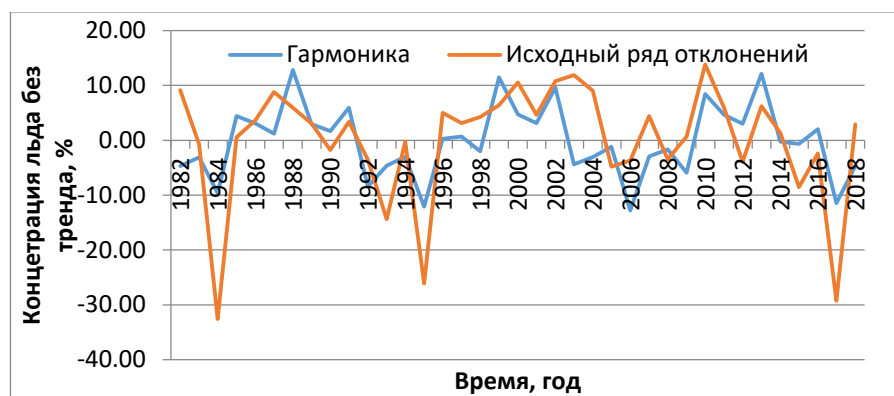
Приложение Г – Таблица характеристик гармоник в сентябре за период с 1982 по 2018 гг.

Точка	Период	Коэффициент Фурье $a_k, ^\circ\text{C}$	Коэффициент Фурье $b_k, ^\circ\text{C}$	Амплитуда $A, ^\circ\text{C}$	Фаза ϕ	Дисперсия $D, ^\circ\text{C}^2$	Вклад гармоники в общую дисперсию V_k/V	$V(r^2)$	r	σ_r	t^*	$t_{кр}$
5	12.0	-9.09	2.38	9.40	-1.31	44.16	0.08	0.08	0.29	0.15	1.88	2.03
	2.8	-14.95	-0.54	14.96	1.53	111.97	0.22	0.22	0.46	0.13	3.50	2.03
6	36.0	-7.52	-16.81	18.42	0.42	169.64	0.23	0.23	0.48	0.13	3.70	2.03
	9.0	3.32	9.01	9.60	0.35	46.06	0.06	0.06	0.25	0.16	1.58	2.03
7	12.0	4.47	2.62	5.18	1.04	13.41	0.07	0.07	0.26	0.16	1.68	2.03
	4.0	-8.57	2.01	8.81	-1.34	38.78	0.20	0.20	0.45	0.14	3.32	2.03
8	36.0	2.07	-5.43	5.81	-0.36	16.86	0.04	0.04	0.20	0.16	1.24	2.03
	4.0	-11.42	1.27	11.49	-1.46	66.00	0.16	0.16	0.40	0.14	2.79	2.03
	3.0	-9.49	4.67	10.58	-1.11	55.94	0.13	0.13	0.37	0.15	2.50	2.03
9	36.0	-0.56	9.94	9.95	-0.06	49.52	0.13	0.13	0.36	0.15	2.43	2.03
	6.0	6.80	8.86	11.17	0.65	62.42	0.16	0.16	0.40	0.14	2.83	2.03
	3.6	-3.02	-7.28	7.89	0.39	31.10	0.08	0.08	0.28	0.16	1.82	2.03
10	18.0	8.14	10.02	12.91	0.68	83.31	0.08	0.08	0.28	0.16	1.78	2.03
	5.1	11.65	9.06	14.76	0.91	108.95	0.10	0.10	0.32	0.15	2.09	2.03
	4.0	-9.83	14.18	17.26	-0.61	148.89	0.14	0.14	0.37	0.15	2.55	2.03
11	18.0	5.32	8.83	10.31	0.54	53.10	0.04	0.04	0.19	0.16	1.19	2.03
	3.6	-7.78	11.51	13.89	-0.59	96.47	0.07	0.07	0.26	0.16	1.65	2.03

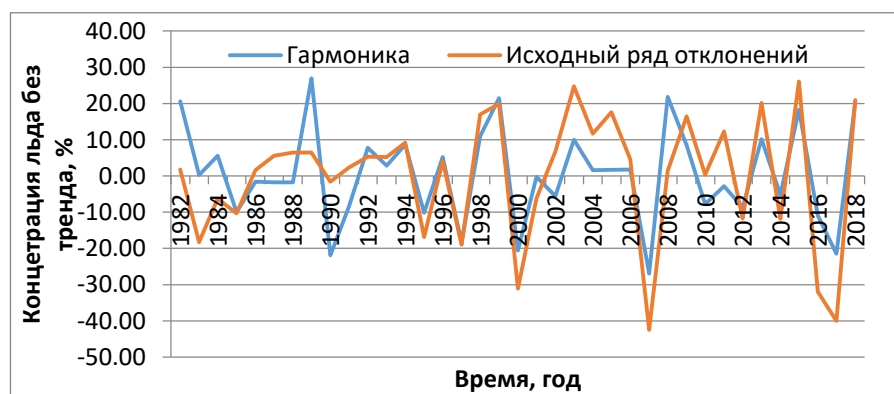
Приложение Д – Результаты гармонического анализа за март 1982-2018 гг.



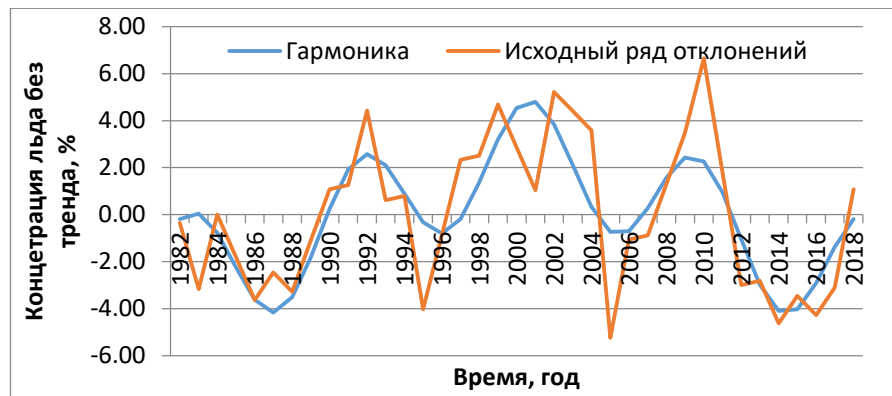
Д.1 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 2 в марте.



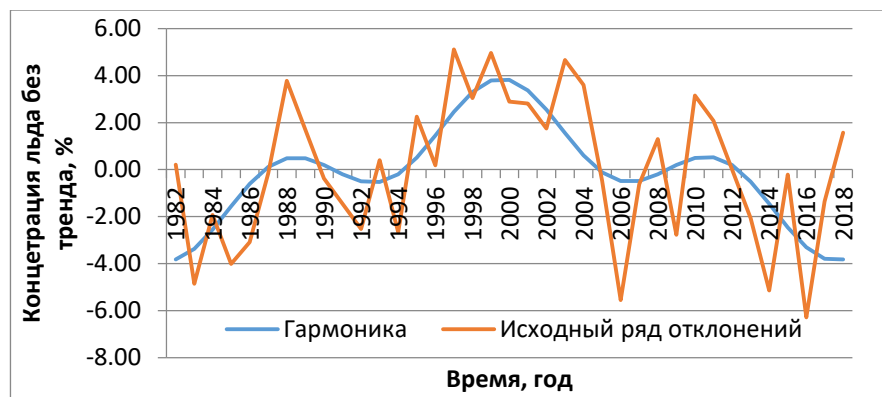
Д.2 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 3 в марте.



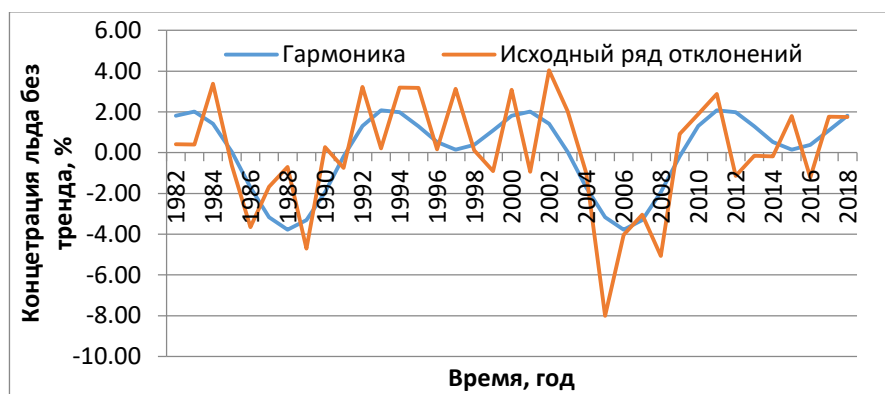
Д.3 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 4 в марте.



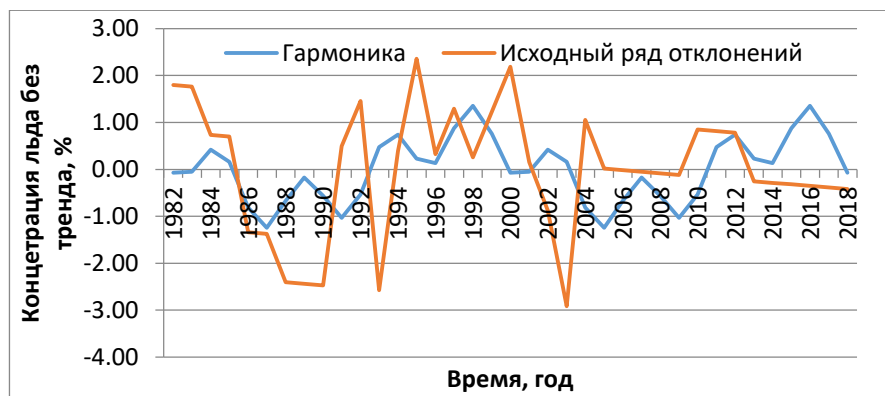
Д.4 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 5 в марте.



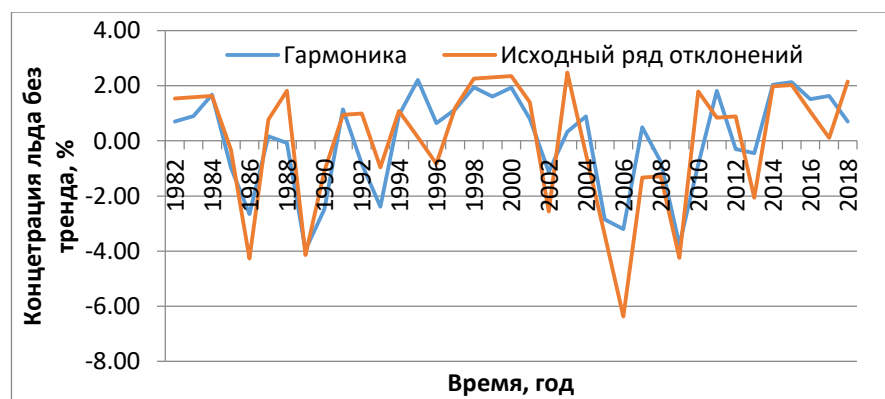
Д.5 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 6 в марте.



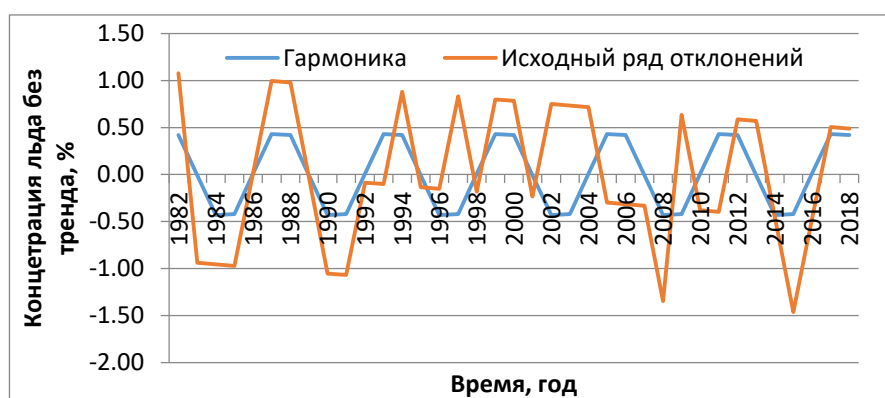
Д.6 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 7 в марте.



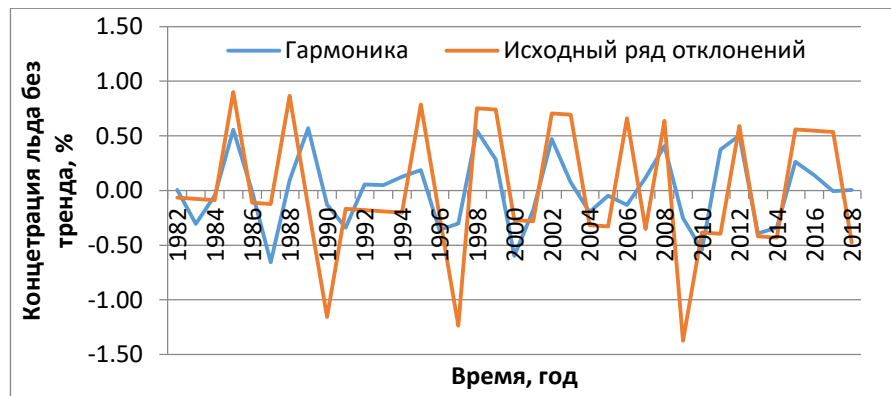
Д.7 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 8 в марте.



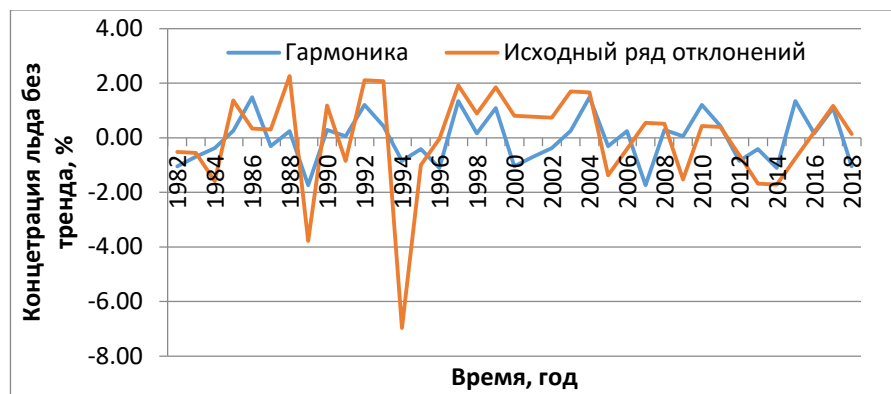
Д.8 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 9 в марте.



Д.9 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 10 в марте.

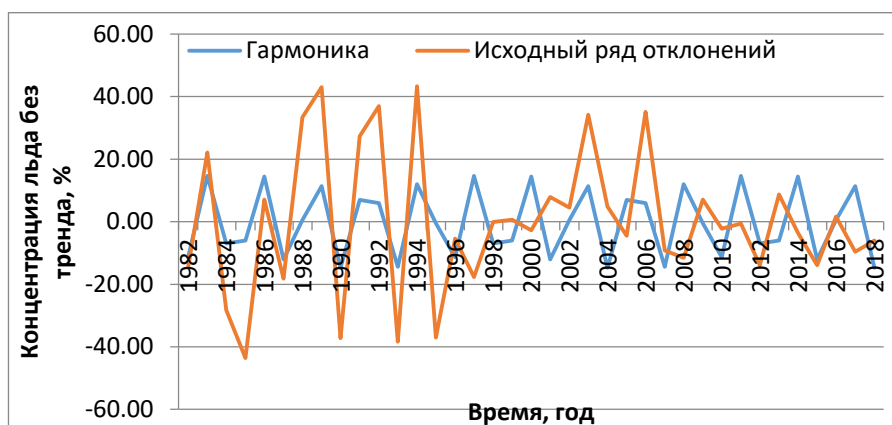


Д.10 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 11 в марте.

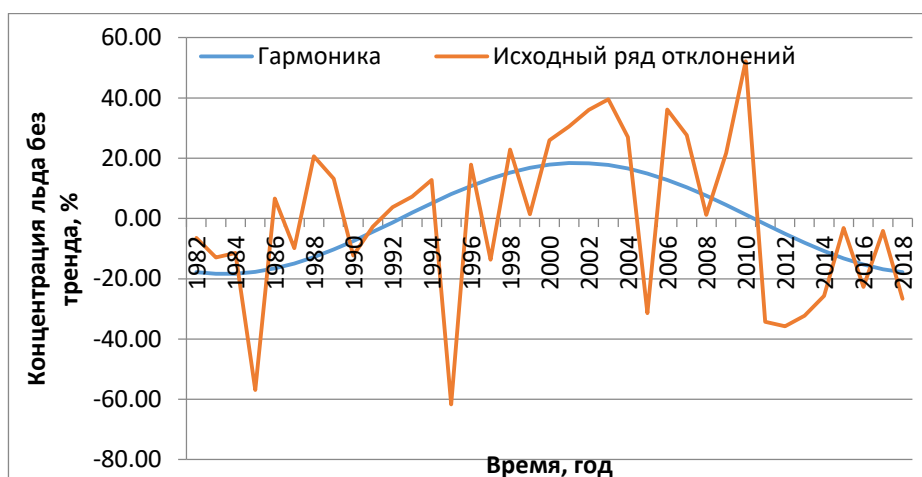


Д.11 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 12 в марте.

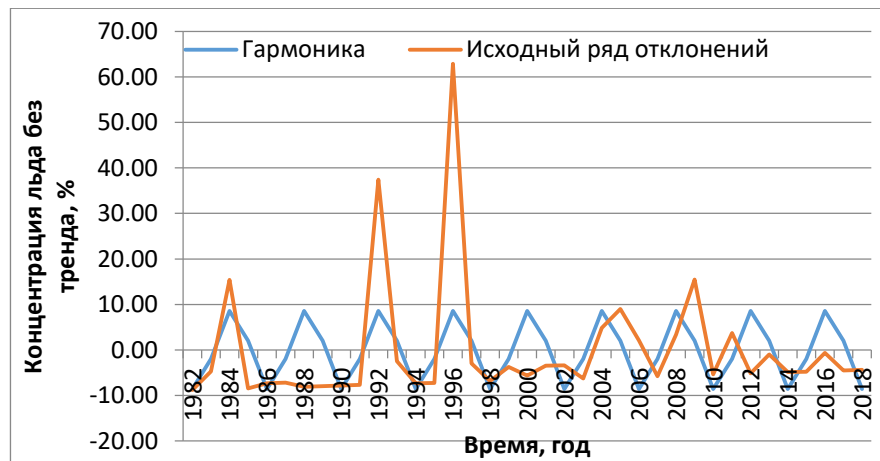
Приложение Е – Результаты гармонического анализа за сентябрь 1982-2018 гг.



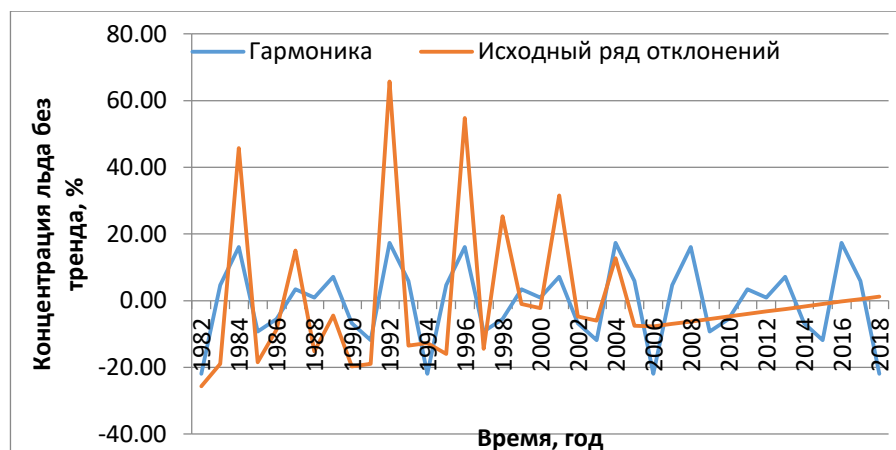
Е.1 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 5 в сентябре.



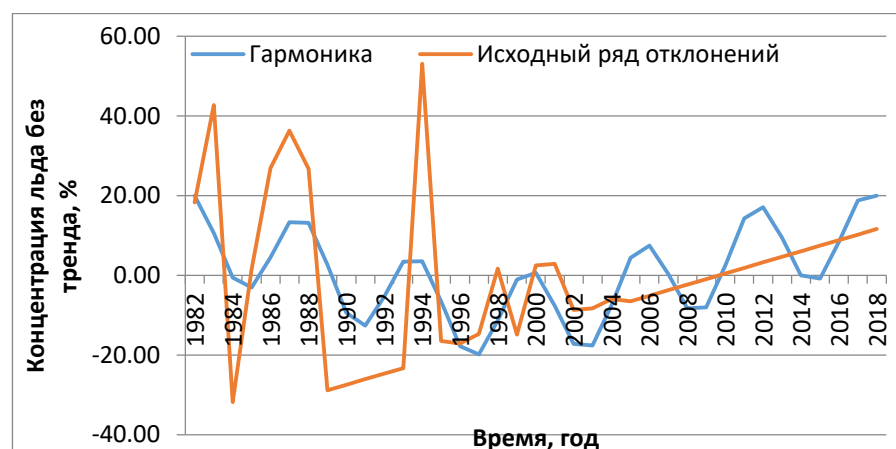
Е.2 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 6 в сентябре.



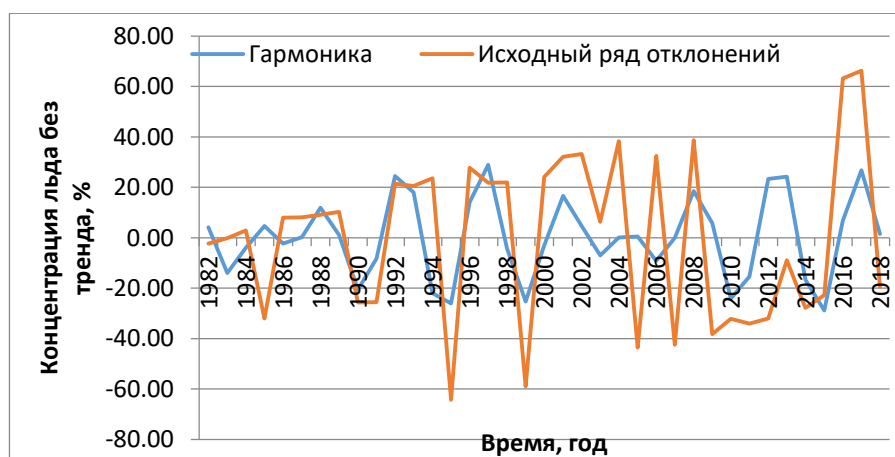
Е.3 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 7 в сентябре.



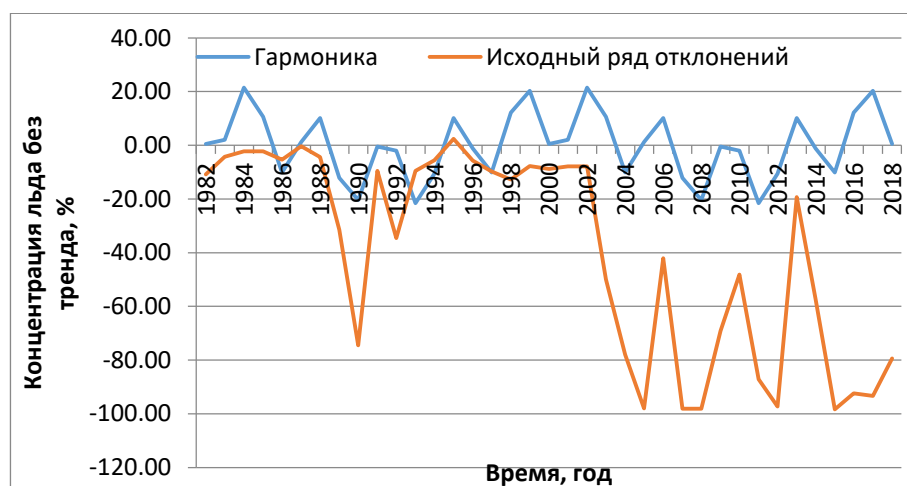
Е.4 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 8 в сентябре.



Е.5 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 9 в сентябре.



Е.6 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 10 в сентябре.

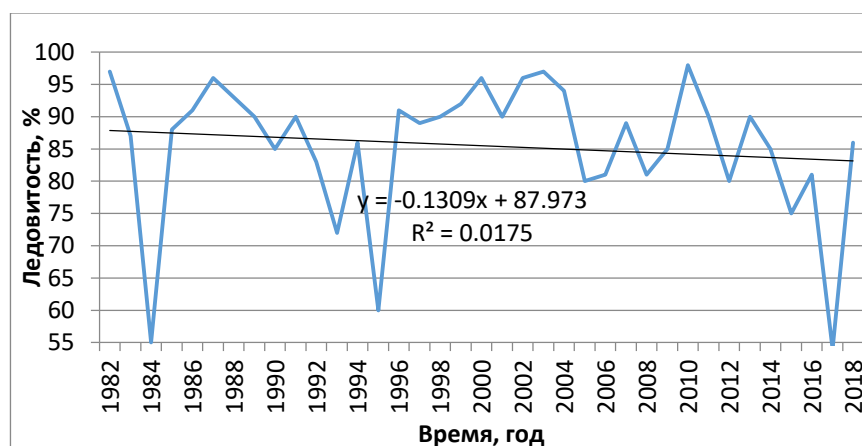


Е.7 – Временная изменчивость ряда отклонений и ряда концентрации льда в точке 11 в сентябре.

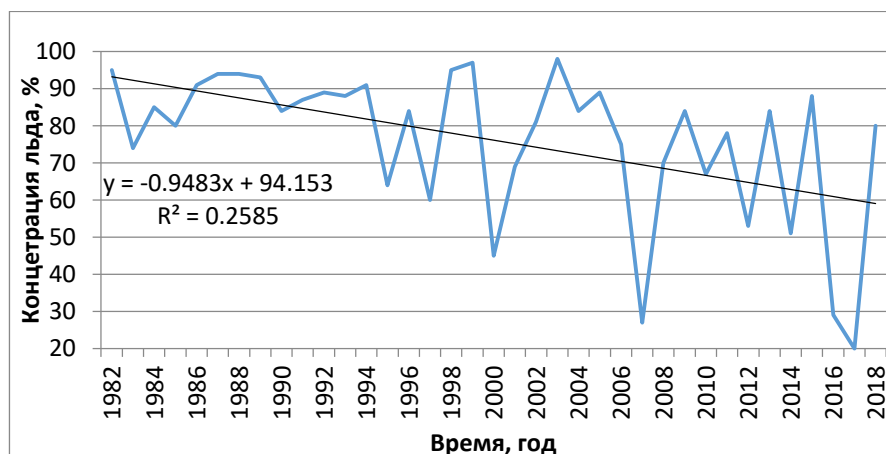
Приложение Ж – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точках вдоль трассы СМП в марте, за период с 1982 по 2018 гг.



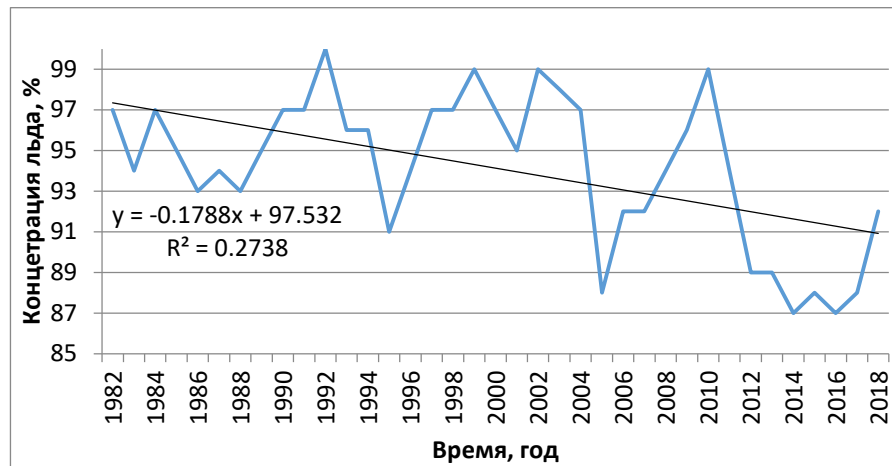
Ж.1 – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 2 в марте.



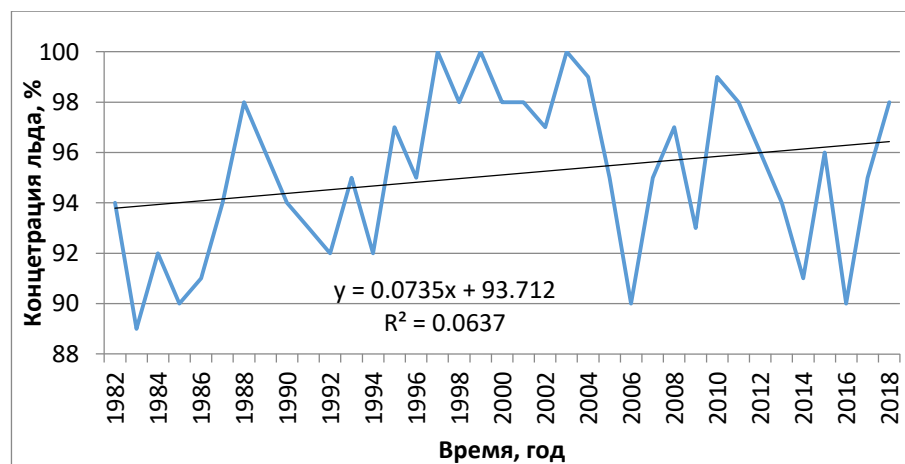
Ж.2 – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 3 в марте.



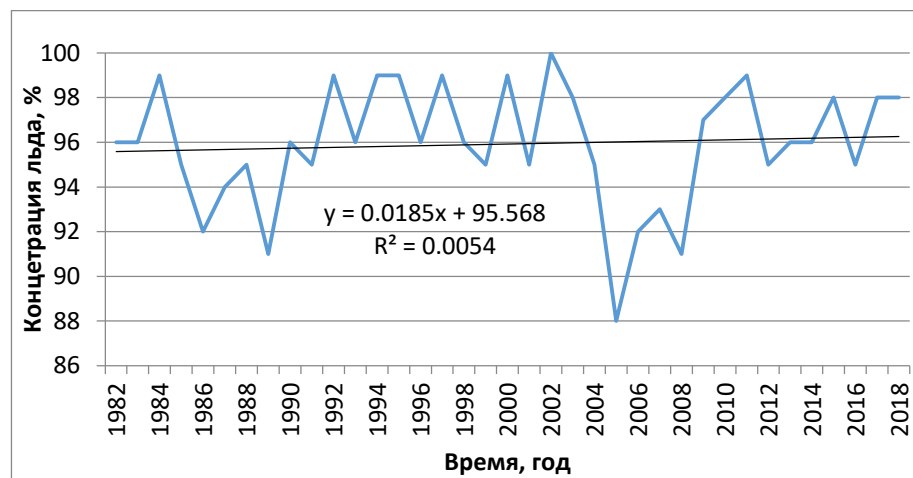
Ж.3 – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 4 в марте.



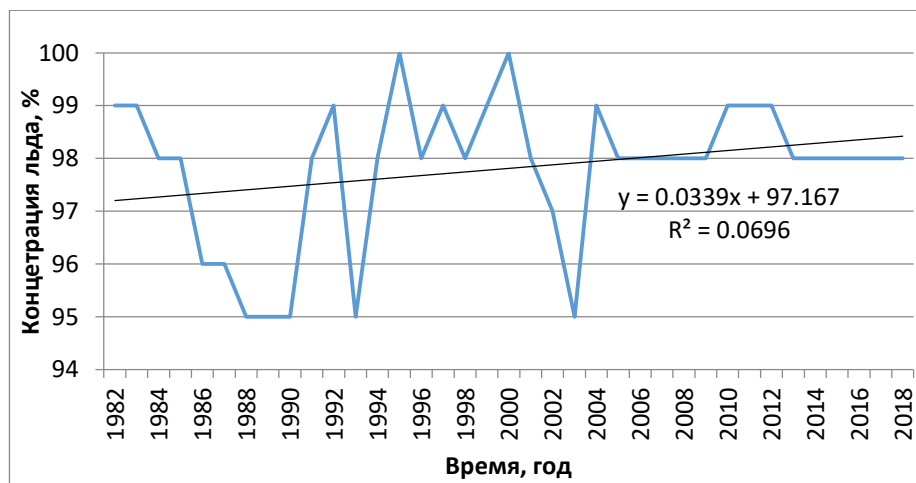
Ж.4 – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 5 в марте.



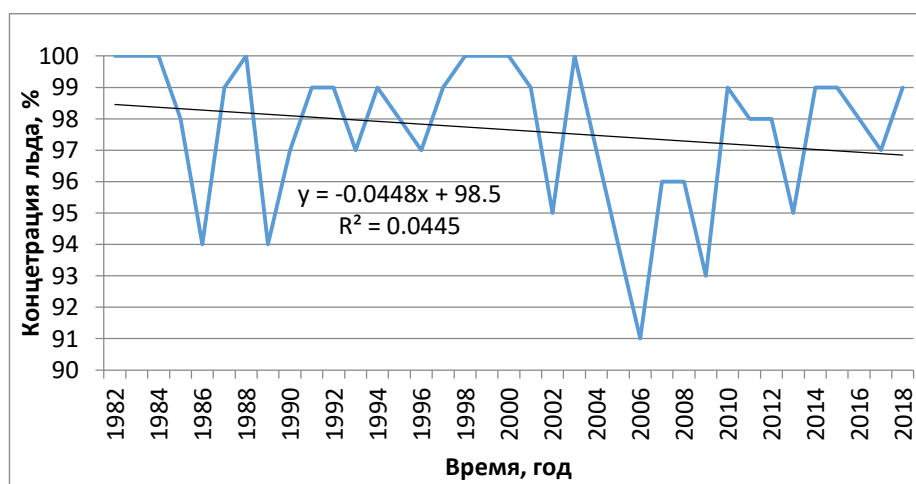
Ж.5 – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 6 в марте.



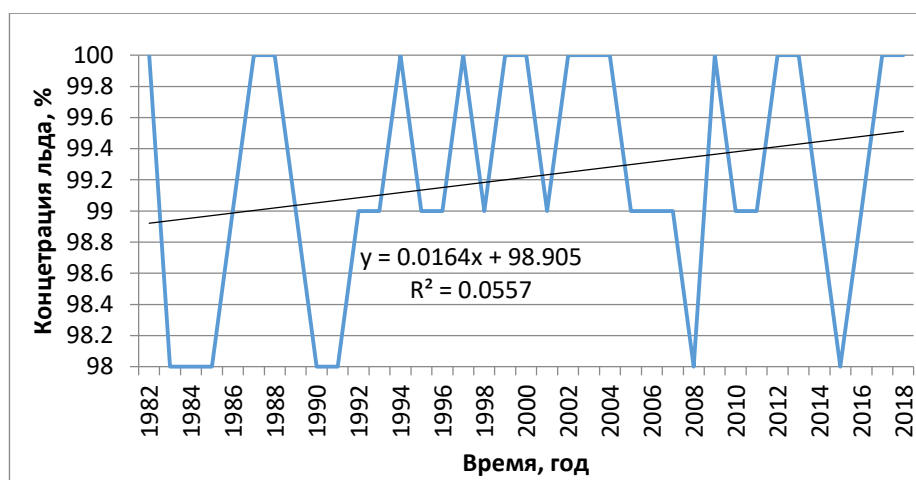
Ж.6 – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 7 в марте.



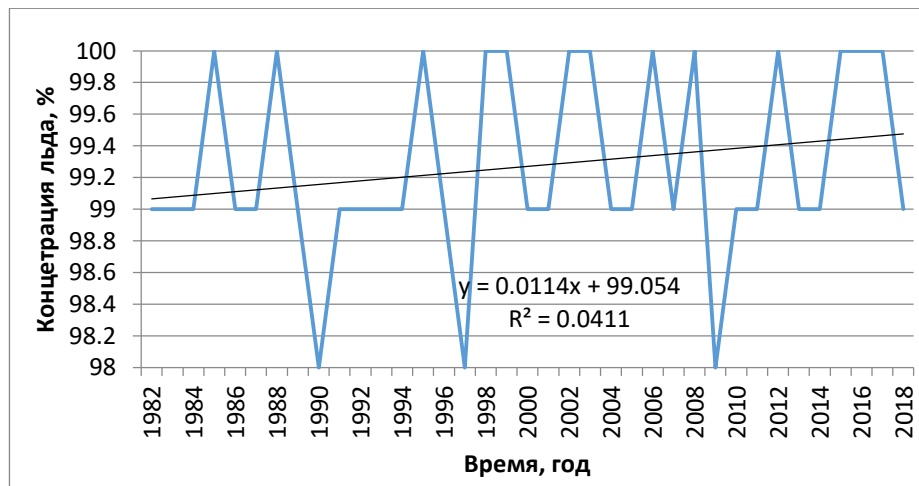
Ж.7 – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 8 в марте.



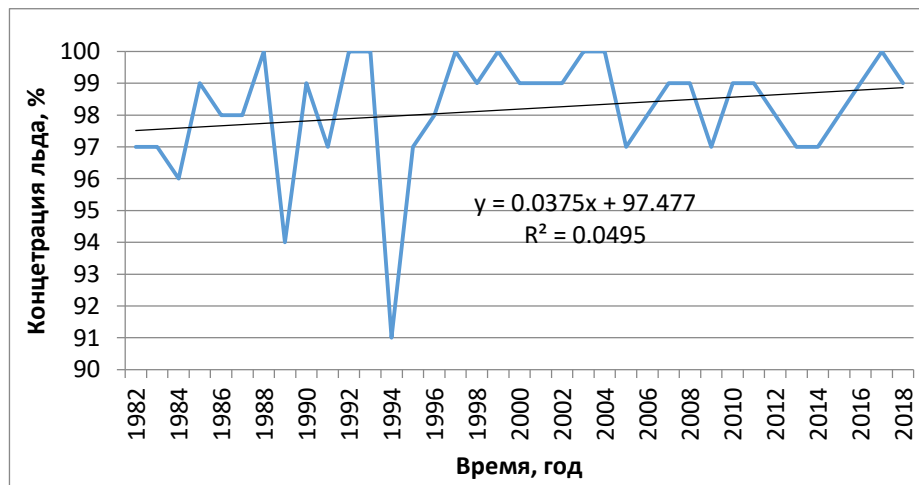
Ж.8 – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 9 в марте.



Ж.9 – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 10 в марте.

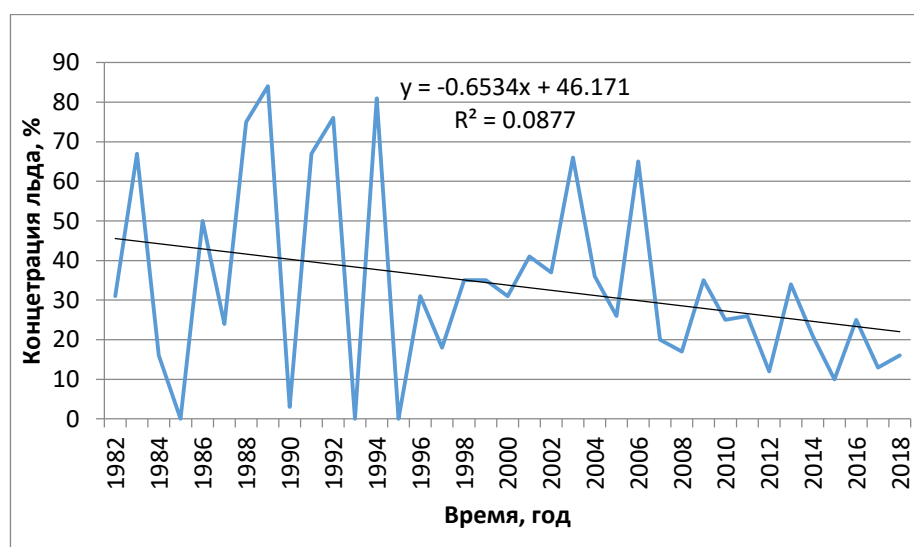


Ж.10– Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 11 в марте.

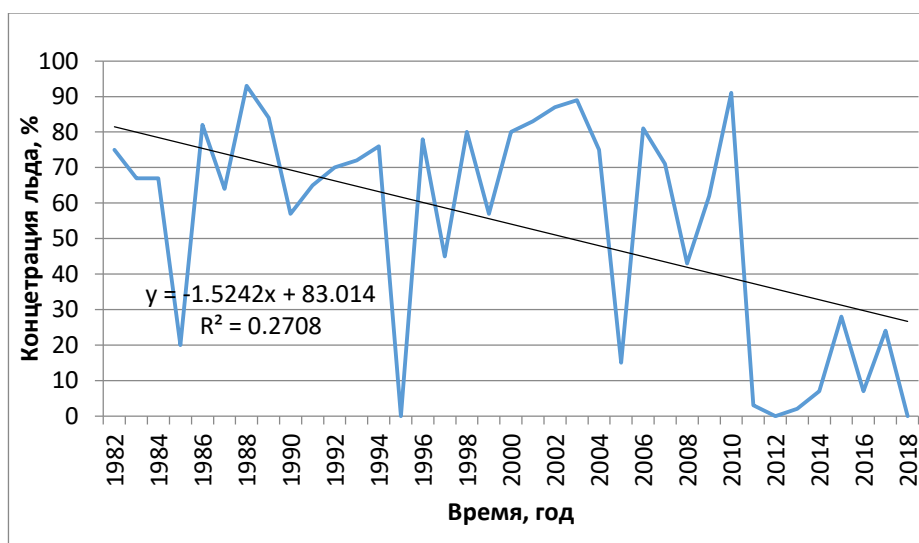


Ж.11 – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 12 в марте.

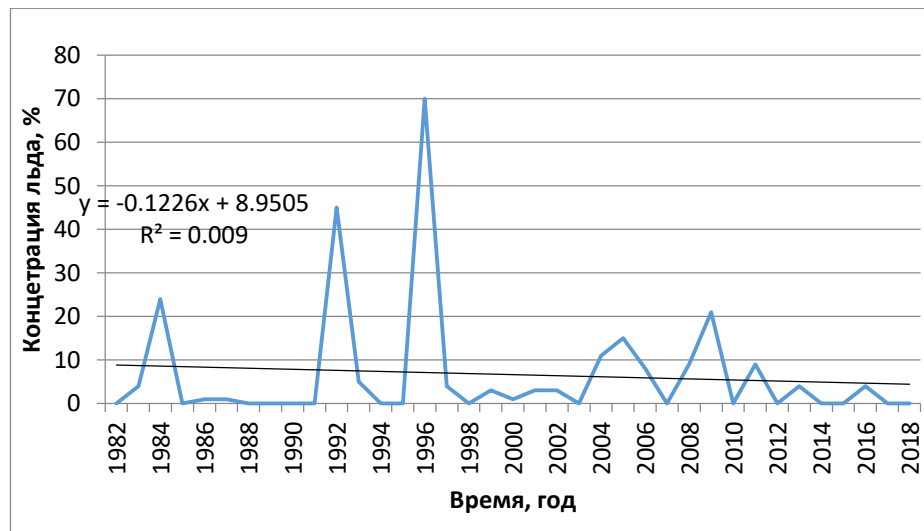
Приложение 3 – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точках
вдоль трассы СМП в сентябре, за период с 1982 по 2018 гг.



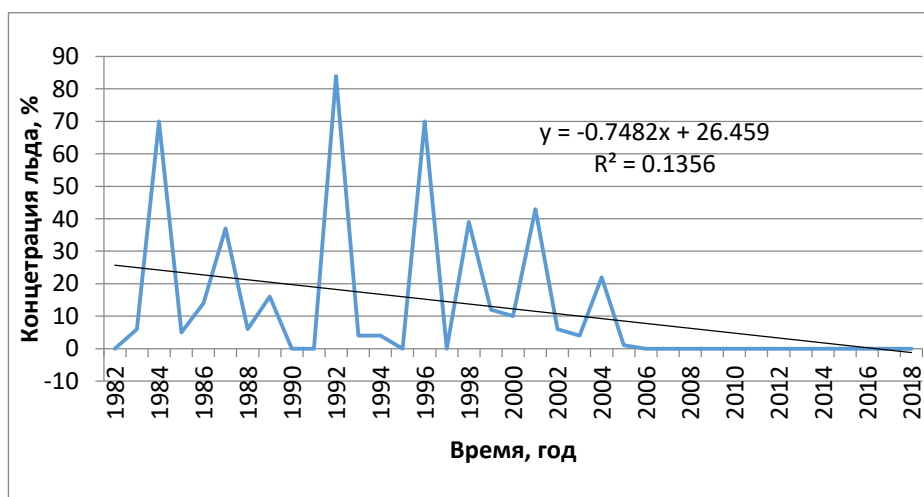
3.1 – Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 5 в сентябре.



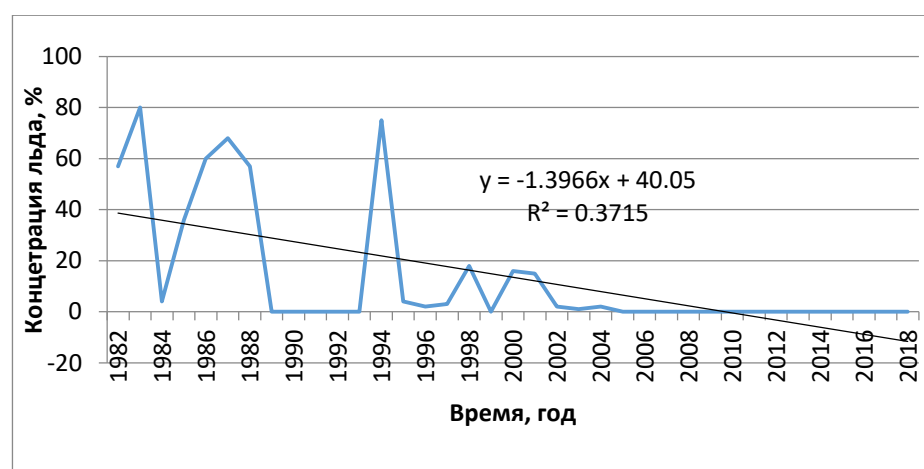
3.2– Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 6 в сентябре.



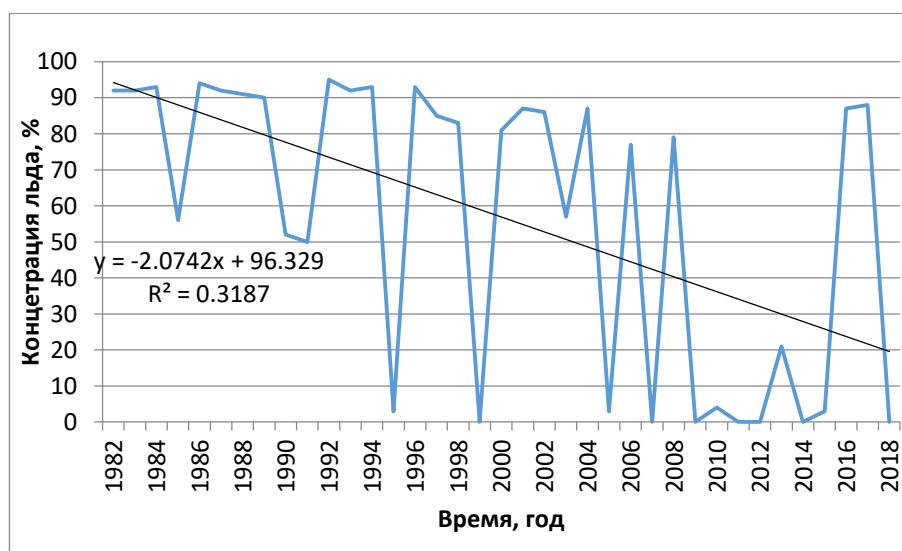
3.3– Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 7 в сентябре.



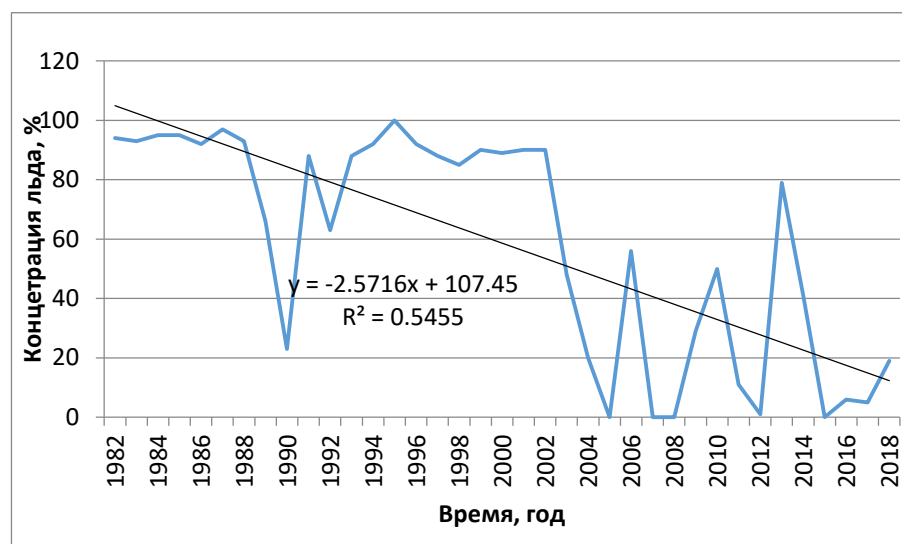
3.4– Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 8 в сентябре.



3.5– Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 9 в сентябре.



3.6– Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 10 в сентябре.



3.7– Временная изменчивость ряда концентрации льда в точке 11 в сентябре.