



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

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему Климатическая изменчивость верхнего распресснённого слоя Карского моря

Исполнитель Малеев Егор Александрович
(фамилия, имя, отчество)

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

Гордеева Светлана Михайловна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____
(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

« ____ » _____ 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Описание района исследования	5
1.1. Физико-географическое описание Карского моря.....	5
1.1.1. Климатическая характеристика Карского моря.....	7
1.2. Гидрологический режим	9
1.2.1. Место Карского моря в системе водообмена Северного Ледовитого океана.. ..	9
1.2.2. Распреснённые водные массы Карского моря	13
1.2.3. Ледовый режим Карского моря	15
Глава 2. Методы исследования и исходные данные	16
2.1. База данных морской службы Copernicus	16
2.2. Описание исходных данных.....	17
2.2.1. Данные солёности и сплочённости льда Карского моря	17
2.3. Методика выполнения работы	19
2.3.1. Кластерный анализ.....	19
2.3.2. Одномерная статистика.....	20
Глава 3. Выявление климатической изменчивости верхнего распреснённого слоя Карского моря.....	23
3.1. Обнаружение пространственных границ верхнего распреснённого слоя Карского моря.....	23
3.2. Выделение климатической изменчивости распреснённого слоя Карского моря.....	30
3.3. Обнаружение связи между сезонными изменениями солёности	38
3.4. Обнаружение связей между сезонной солёностью и другими физическими факторами.....	44
Заключение.....	46
Список используемых источников.....	51

ВВЕДЕНИЕ

Северный Ледовитый Океан с момента своего открытия был наименее изученной частью Мирового Океана. Сегодня же исследования морских акваторий Арктического региона являются передовыми направлениями для современной науки. Арктика представляет интерес не только для учёных гидрометеорологов, но и для людей из самых широких сфер деятельности: нефтегазового дела, проводки судов, развития туризма за полярным кругом. Ключевую роль в деятельности человека в Арктике играют северные моря. На текущий момент есть все возможности для изучения морей Северного Ледовитого Океана или получения данных о них – современные технологии позволяют использовать информацию о состоянии толщи воды и атмосферы над ней практически с любого участка изучаемой акватории.

Одним из главных морей Арктики является Карское море. Представляя собой источник распреснённых водных масс, Карское море своими водами может менять гидрологические характеристики ближайших морей. Изучение гидрологического режима Карского моря и его влияние на Арктику в целом – одна из важных и интересных задач, которая может возникнуть перед современным мировым научным сообществом мира и нашей страной. В Карском море происходят активные динамические океанические процессы, широко развита деятельность людей: по морю проходит Северный Морской Путь, а также море является местом для нескольких природных заповедников, расположенных на островах и архипелагах. В данной работе будет рассмотрена климатическая изменчивость верхнего распреснённого слоя Карского моря, который влияет на его гидрофизические, гидрохимические и также биологические процессы в толще воды.

Актуальность данной работы заключается в оценке динамики верхнего распреснённого слоя Карского моря и его гидрологических характеристик на текущий момент по данным реанализа морской службы Copernicus. Изучение пресного стока в Карское море наиболее актуально сейчас, так как в связи с

циклическими колебаниями климата на Земле, должны совершаться колебания и характеристики стока рек данного моря, а значит, менять его гидрологический режим.

Целью данной работы является выявление климатических изменений верхнего распреснённого слоя Карского моря. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- 1) Сделать обзор научных исследований о верхнем распреснённом слое Карского моря;
- 2) Статистической классификацией выявить класс с наименьшей солёностью на отдельных участках Карского моря и рассчитать объём занимаемой им воды;
- 3) Сделать анализ климатической изменчивости верхнего распреснённого слоя Карского моря;
- 4) Обозначить наличие связей между распреснением Карского моря и другими природными факторами.

Глава 1. Описание района исследования

1.1. Физико-географическое описание Карского моря

Карское море – мелководное полузамкнутое море в Северном Ледовитом океане, ограниченное Северным побережьем Евразии (Югорский полуостров, полуостров Ямал, полуостров Таймыр) на юге, архипелагом Новая Земля на западе и архипелагом Северная земля на северо-востоке. Связано с Баренцевым морем через пролив Карские ворота, а также на севере соединяется с ним в районе глубоководного жёлоба Святой Анны, а с морем Лаптевых соединяется через пролив Вилькицкого (рисунок 1.1) [1].

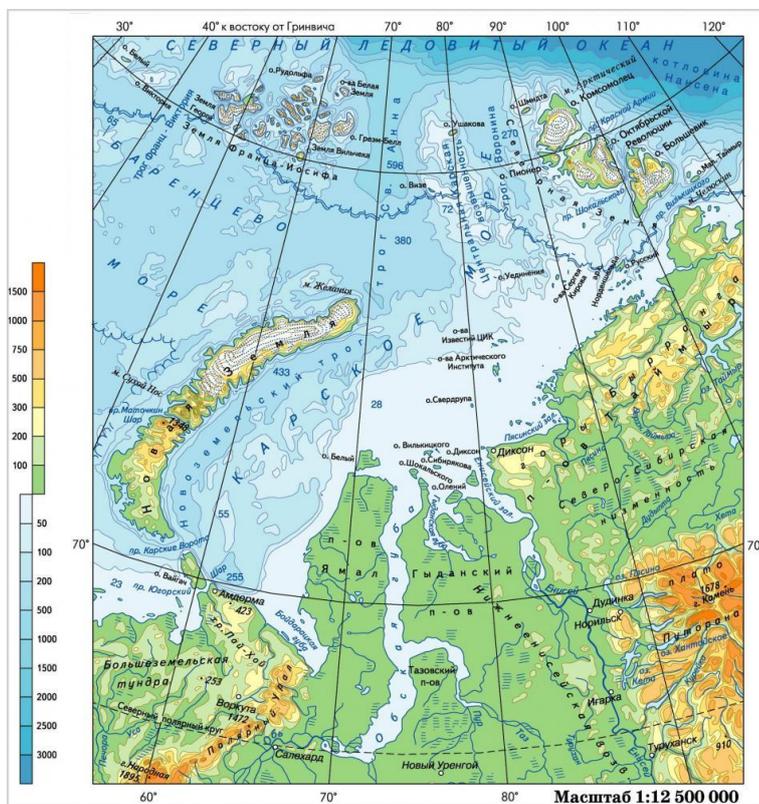


Рисунок 1.1 – Физико-географическое расположение Карского моря [2].

Шельфовая часть моря, не глубже 50 м, располагается в юго-западной и южной частях Карского моря, составляет примерно 40% его площади [1]. Подводная Центральная Карская возвышенность разделяет два жёлоба, врезающиеся в шельф Карского моря со стороны Северного Ледовитого океана

– Святой Анны и Воронина. Вдоль всего восточного побережья архипелага Новая Земля расположена Новоземельская впадина.

На шельфе Карского моря преобладает Западно-Сибирская платформа, в структуре осадочного чехла которой выделяют Южно-Карскую (в юго-западной части моря) и Северо-Карскую (в северо-восточной части) впадины. Южно-Карская впадина заполнена терригенными отложениями юры и мела (мощность 8-14 км). В Северо-Карской впадине глубина залегания платформенного фундамента 12-20 км; она заполнена палеозойскими и мезозойскими отложениями, обладает нефтегазовым потенциалом. Современные терригенные осадки представлены в желобах коричневыми, серыми и синими глинистыми илами; на подводной возвышенности и шельфе – песчанистыми илами, в которые погружены железомарганцевые конкреции; на отмелях и вблизи берегов представлены песками [3].

Площадь Карского моря составляет 893.4 км², объём его вод – 101 тыс. км³, наибольшая глубина около 600 м (жёлоб Святой Анны), средняя глубина 113 м. Наибольшая протяжённость с северо-востока на юго-запад – 1500 км между 81° и 68° с. ш., максимальная ширина в северной части Карского моря – 800 км. Длина береговой линии вдоль материка 9047 км, а вдоль островов 5653 км. Крупнейшие заливы Карского моря – Байдарацкая губа, Обская губа, Енисейский залив, Пяснинский залив, Гыданская губа и Таймырский залив – сильно врезаются в материковый берег. Крупнейшие реки, впадающие в море – Енисей, Обь, Пясина, Пур, Таз, Кара. В Карском море расположено большое количество островов, их общая площадь составляет 10 000 км² [4].

В Карское море ежегодно поступает огромный сток пресной воды (≈ 1500 км³). Основные источники этого стока – Обская губа (530 км³) и Енисейский залив (630 км³). Объём континентального стока Карского моря меняется в зависимости от периода: периода паводков в июне-июле, которые составляют 50% годового стока и длительного периода малого объёма стока в октябре-апреле, который вызван замерзанием впадающих рек в море [1,5].

Сток пресной воды в Карское море образует опреснённый поверхностный слой, который является одним из крупнейших пресноводных хранилищ в Северном Ледовитом океане [1].

1.1.1. Климатическая характеристика Карского моря

Климатические условия Карского моря – холодные, полярные. Зима длится долго, температура воздуха ниже 0 °С сохраняется на севере моря от 9 до 10 месяцев, а на юге от 7 до 8 месяцев. Особенности географического положения Карского моря и атмосферная циркуляция над акваторией создают отчётливые различия в температурном режиме над разными частями моря. Средняя годовая температура воздуха над юго-западной частью на 5-7 °С выше, чем над северо-восточной частью. Самым холодным месяцем на северо-западе Карского моря является февраль, самым же тёплым – август. В северо-восточном районе моря самым тёплым месяцем считается июль. Средняя температура воздуха в январе в юго-западной части моря составляет -21 °С и -28.4 °С в восточной. В июле преобладающая температура атмосферы над всей акваторией моря выше 0 °С, минусовые значения наблюдаются только на севере [6].

Средние значения температуры опускаются ниже 0 °С в северной части моря во второй половине августа, в юго-западной части – в конце сентября-начале октября. Такое позднее наступление минусовых температур связано не только с адвекцией тёплого воздуха в циклонах, но и с тепловым эффектом водных масс, приходящих в Карское море из Баренцева [6].

Взаимодействие трёх основных центров стационарных атмосферных барических образований, а именно Сибирского антициклона, Полярного барического максимума и Исландского минимума, определяют климатическую изменчивость Карского моря. Зимой, когда возникает формирование Сибирского антициклона и происходит усиление Полярного максимума, в южной части моря преобладают ветры южных направлений, на северо-востоке наблюдаются ветра северных румбов. В весенний период Сибирский максимум разрушается, влияние Исландского минимума почти не проявляется, сильно ослабевает и

перемещается к северу Полярный максимум. В таких условиях циклоническая активность развивается слабее, чем антициклоническая, дуют неустойчивые, слабые ветра, часто наблюдаются штормы. Наибольшее количество штормовых дней приходится на западную часть моря. В тёплое время года над акваторией формируется область высокого давления, что приводит к образованию ветров северных румбов. Погодные условия над Карским морем отличаются неустойчивостью и резкими изменениями температуры [6].

Ветровой режим над акваторией Карского моря характеризуется высокой межгодовой изменчивостью: в некоторые зимы преобладает ветер северо-восточных румбов, а иногда в тёплое время года преобладает западный воздушный перенос, который вызывает ветровое волнение моря. Средние значения скорости ветра над акваторией незначительно варьируются от сезона к сезону, годовая амплитуда которых не превышает 1-3 м/с. Максимальные средние значения, которые связаны с повышением циклонической деятельности, составляют 8 м/с. Скорость ветра зависит от его направления: наиболее сильные ветра имеют западные румбы [6].

Среднемноголетний режим облачности формируется под влиянием циркуляционных процессов, определяющих направление воздушных масс и содержание в них влаги. Условия облачности над морем характеризуются сильно выраженными годовыми колебаниями с максимальными значениями летом и минимальными зимой. Средний облачный покров в январе закрывает 50-60% неба, а с июня по октябрь увеличивается до 80-90 %. Повторяемость дней с пасмурным небом в навигационный период составляет 80-90 % [6].

Относительная влажность воздуха, характеризующая степень насыщения водяным паром воздуха над Карским морем в течение всего года держится на высоком уровне, максимальных значений (80-90 %) достигает в тёплый период года. С такой влажностью связана большая частота выпадения осадков в течение всего года, но годовая величина осадков невелика и составляет 250 мм в северной и 400 мм в юго-западной частях моря [6].

1.2. Гидрологический режим

Температура поверхностного слоя Карского моря зимой, в основном, приближена по своим значениям к температуре замерзания воды. В летние месяцы значения температуры воды меняются от 0 °С в северо-восточной части моря до 5 °С в южных районах, близких к побережью. Значения солёности в зимние месяцы понижаются с северо-западной части моря в сторону юго-восточной части моря от 34‰ у архипелага Новая Земля до 20‰ у острова Диксон. В летнее время года солёность уменьшается с севера на юг от 33‰ на широте архипелага Земля Франца-Иосифа до 11‰ у острова Диксон [3].

1.2.1. Место Карского моря в системе водообмена Северного Ледовитого океана

Северный Ледовитый океан особенно влияет на глобальную циркуляцию Мирового океана, распространяя более плотную и холодную воду в северо-западную часть Атлантического океана, что способствует более выраженной конвекции в данном районе Мирового океана. Основным процессом, который происходит в Арктике – это охлаждение и обновление относительно тёплой и солёной воды, поступающей через пролив Фрама, что западнее архипелага Шпицберген, и Баренцево море из Северной Атлантики, прежде чем вода вернётся обратно через пролив Фрама или Канадский Арктический архипелаг (рисунок 1.2). Некоторые воды становятся плотнее, чем пришедшие, некоторые – более лёгкими за счёт физического процесса трансформации водных масс в Арктике. Карское море является важнейшим звеном в цепочке преобразования водных масс [7].

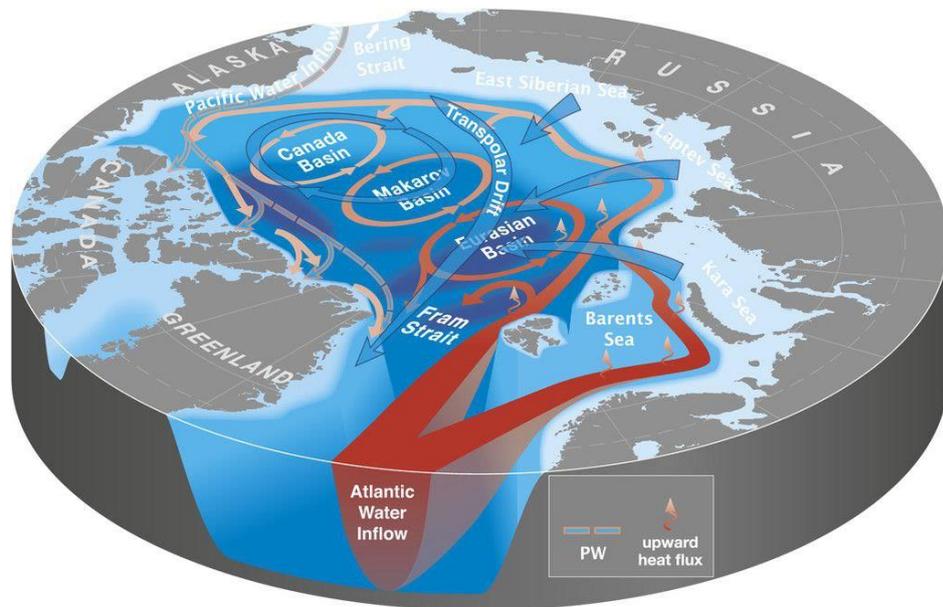


Рисунок 1.2 – Циркуляция поверхностных вод (синий), промежуточных тихоокеанских вод (розовый/синий) и атлантических вод (красный) бассейна Северного Ледовитого океана [8].

Основной же причиной уплотнения атлантической воды в Арктическом бассейне является поверхностная потеря тепла в Баренцевом море. На большей остальной части акватории Северного Ледовитого океана, атлантическая водная масса покрывается более лёгким и пресным поверхностным слоем, который, в значительной степени, образуется за счёт притока пресной воды из рек с суши, а также за счёт выпадения осадков и схода материковых льдов в море. Самый объёмный источник поступления пресной воды в Северный Ледовитый океан – это сток рек с Сибирского побережья Евразии, а также Северной Америки, который составляет примерно $4200 \text{ км}^3/\text{год}$ (данные за 2000-2010 гг.). Осадки способствуют дальнейшему развитию этой поверхностной водной массы, их объём составляет примерно $2200 \text{ км}^3/\text{год}$ (данные за 2000-2010 гг.). Также источником распреснённой воды служит поток воды из Тихого океана через Берингов пролив, так как солёность этой воды много ниже, чем у атлантического потока течений. Объём Тихоокеанской воды примерно составляет $2600 \text{ км}^3/\text{год}$ (данные за 2000-2010 гг.) [7].

Общая схема циркуляции вод в Карском море представлена на рисунке 1.3. Согласно предложенной схеме Восточно-Новоземельское течение, являющееся продолжением Западно-Новоземельского течения в Баренцевом море, вдоль восточных берегов архипелага следует на юго-запад. Баренцевоморские воды от Карских ворот пересекают Байдарацкую губу и у побережья полуострова Ямал поворачивают на север в виде Ямальского течения. К северу от полуострова это течение сливается с Обь-Енисейским и немного севернее образует ответвление на запад к Новой Земле, где соединяется уже с водами Восточно-Новоземельского течения. Этот поток у пролива Карские Ворота разветвляется, и одна из его частей в виде течения Литке огибает с юга Новую Землю и уходит обратно в Баренцево море, а большей частью замыкает циклонический круговорот в юго-западной части Карского моря. Западно-Таймырское течение распространяется вдоль берегов Таймыра до проливов Вилькицкого и Шокальского, через которые проникает на акваторию моря Лаптевых. Как Ямальское течение, так и Западно-Таймырское, которое является продолжением первого, выносят опреснённые континентальным стоком воды Карского моря в Центральный Арктический бассейн и море Лаптевых [9, 10].

Значения поступления и расхода пресной воды, как правило, не находятся в равновесии, так как доля поступающей пресной воды сохраняется в Северном Ледовитом океане вместо того, чтобы сразу уходить за его пределы. Сохраняться водная масса в Северном Ледовитом океане может от 1 до 10 лет [11]. Этот процесс сбора и высвобождения воды связан с колебаниями циркуляции, которые были вызваны циклическими колебаниями изменения режима ветра в районе моря Бофорта, а также шельфовой зоны Азии [7, 12, 13].

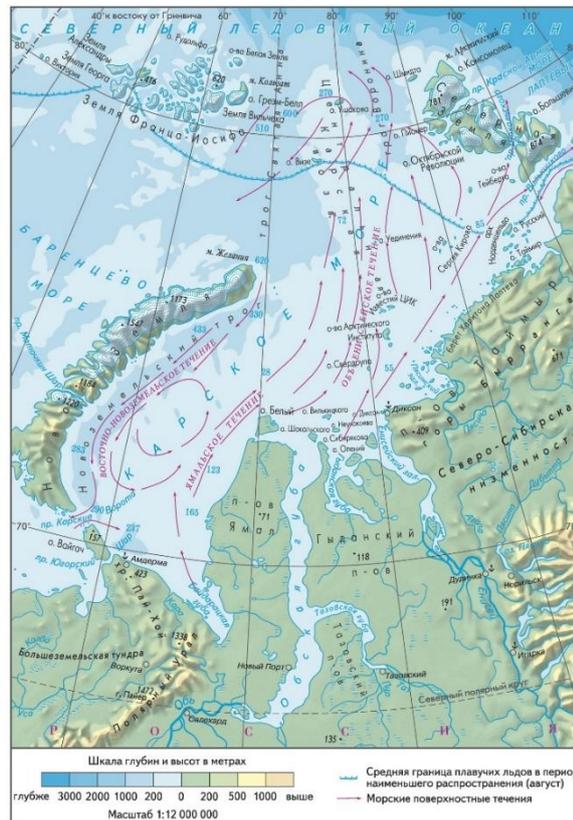


Рисунок 1.3 – Система течений Карского моря [3].

Динамика наличия пресной воды в Арктике в последнее время может быть связана с воздействием неустойчивости атмосферного давления на источники, поглотители и запасы пресной воды. Специалисты предполагают, что запасы пресной воды в Северном Ледовитом океане начали увеличиваться с 2003 года, и прогнозируют, что этот процесс может продолжаться в связи с усилением потепления климата. Сток из рек прогнозируется на уровне около $5500 \text{ км}^3/\text{год}$, а осадки на уровне около $2500 \text{ км}^3/\text{год}$ к 2100 году [7, 14].

Согласно принятым классификациям водных масс, в Карском море существует пять основных водных масс: пресные речные воды, поверхностные воды Арктического бассейна и Карского моря, баренцевоморские воды, глубоководные тёплые атлантические воды [15]. Рассмотрим подробнее интересующую нас речную водную массу.

1.2.2. Распреснённые водные массы Карского моря

Речные плюмы – опреснённые водные массы, формирующиеся в море в результате смешивания пресных речных с морскими солёными водами. Горизонтальная динамика речного плюма зависит от различия в плотности между опреснённым речным плюмом и нижележащими морскими водами. Речные плюмы распространены во всех прибрежных зонах Мирового океана, представляя собой большие по площади, но тонкий поверхностный слой моря, отделённый градиентом плотности от морских вод. Площадь плюма в несколько раз превышает его мощность: даже небольшие по объёму своего стока реки, например, с расходом воды в единицы метров кубических в секунду, формируют площади, занятые пресной водой, составляющие десятки и сотни метров. Полноводные реки формируют плюмы поверхностной распреснённой воды площадью сотни километров. Объём всего материкового стока колеблется от 7% до 21% всей прибрежных вод Мирового океана в зависимости от сезона, занимающий несколько миллионов квадратных километров, не смотря на относительно небольшой объём всего стока рек (38 тыс. км³) в Мировой океан по сравнению с общим объёмом шельфовых вод (666 млн. км³) [16].

Речные плюмы играют огромную роль в процессах, происходящих в прибрежной зоне моря: они влияют на биогеохимические, физические процессы на данной акватории, формируя стратификацию водной толщи, прибрежные течения, а также распределение водных масс. Речной сток выносит терригенный материал, биогенные элементы, он является источником тепла и воды для принимающей плюм акватории. Также речные плюмы являются переходной зоной между морской и речной водными массами, образуя трансформацию и перераспределение потоков, таким образом, влияя на связь материковых и морских природных систем [16].

Структура и динамика изменчивости речных плюмов – главные факторы для оценки системы адвекции, конвекции, перехода, аккумуляции и диссипации в океане речного стока, взвешенных, растворённых веществ материкового образования [16].

В конце лета - начале осени плюм занимает значительную часть Карского моря, площадь которого может превышать 40 тыс. км². В среднем, солёность плюма составляет менее 28‰, которая не сильно подвержена изменениям, из-за большой разности в значениях плотности слоёв моря. Нижележащий слой практически исключает турбулентное перемешивание более солёных слоёв [6].

Динамика плюма в Карском море определяется высокой межгодовой изменчивостью: распространение плюма обусловлено трением ветра и геострофической динамикой течений. В течение многих лет подряд наблюдались три разных типа распространения плюма: «западный», «восточный» и «центральный». Для «западного» типа характерно распространение плюма в сторону восточного побережья архипелага Новая Земля, а «восточный» тип плюма распространяется вдоль побережья Сибири на восток до пролива Вилькицкого, «центральный» тип плюма распространяется в основном на север моря [6].

Одной из главных особенностей плюма, который образуют реки Обь и Енисей является значительная пространственная неоднородность физико-химических параметров его отдалённой части, которая вызвана следующими причинами: во-первых, несмотря на то, что Обская губа и Енисейский залив находятся вблизи друг друга, между ними располагается 250 км водной поверхности, что значительно превышает локальный радиус деформации Россби, который составляет 5 км. В результате терригенные донные отложения преобладают в областях плюмов, прилегающих в соответствующим заливам, образуя сложные смешивания внутри плюмов. Эта ситуация отлична от плюмов других рек, имеющих один и тот же эстуарий. Во-вторых, обе реки имеют относительные равные скорости расхода воды, из чего следует, что пространственные масштабы Обской и Енисейской частей плюма имеют одинаковый порядок величин [17].

1.2.3. Ледовый режим Карского моря

Карское море покрыто льдом большую часть года. Южная часть моря, которая непосредственно прилегает к Обской губе и Енисейскому заливу, покрыта припаем с ноября по июнь. На образование льда здесь влияет континентальный сток, так как сезонный паводковый сток тёплой воды из рек способствует более быстрому вскрытию берегового льда и переносу льда в центральную часть Карского моря [17].

Прибрежную зону занимает припай, который развит неравномерно. В северо-восточной части моря неподвижный лёд образует сплошную полосу, которая тянется от острова Белый до архипелага Норденшёльда и далее к Северной Земле. В тёплое время года полоса припая взламывается, распадаясь на отдельные ледяные поля, которые долгое время сохраняются, образуя Североземельский ледяной массив.

Специалистами было отмечено, что ледяной покров в Карском море уменьшается, а высота волн из года в год увеличивается. Ветры и волны в Баренцевом и Карском морях сначала усиливались с 1996 по 2006 год, а затем уменьшались до 2015 года [18].

Глава 2. Методы исследования и исходные данные

2.1. База данных морской службы Copernicus

Исходной базой данных служит морская служба Copernicus (или служба мониторинга морской среды), которая является компонентом финансируемого Европейским Союзом проекта MyOcean. Служба Copernicus предоставляет пользователям бесплатную, регулярную, систематизированную и достоверную информацию о физическом, а также биогеохимическом состояниях вод Мирового океана в глобальном и региональном масштабах [19].

Морская база данных – Global Ocean Physics Reanalysis. Продукт GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030 – это реанализ CMEMS global ocean eddy-resolving (файлы отображаются на стандартной регулярной сетке с горизонтальным разрешением $1/12^\circ$, шаг сетки 0.083° , 50 вертикальных уровней), усваивающий альтиметрию (с 1993 года) [19].

База данных в большей степени основана на существующей системе глобального прогнозирования CMEMS в реальном времени. Модельный компонент – платформа NEMO, управляемая на поверхности ECMWF ERA-Interim, а затем ERA5 reanalyses за последние годы. Все наблюдения ассимилируются с помощью фильтра Калмана редуцированного порядка. По данным трекового высотомера (аномалия уровня морской поверхности) совместно ассимилируются спутниковая температура поверхности моря, концентрация морского льда, а также вертикальные профили температуры и солёности *in situ*. Кроме того, схема 3D-VAR обеспечивает коррекцию медленно развивающихся крупномасштабных смещений температуры и солёности [19].

Этот продукт включает в себя среднесуточные и среднемесячные значения температуры, солёности, течений, уровня моря, глубины смешанного слоя и параметров льда сверху до дна. Временной охват – с 1993.01.01 по настоящее время. Формат файлов – NetCDF-4. Временное разрешение – среднесуточные значения [19].

2.2. Описание исходных данных

2.2.1. Данные солёности и сплочённости льда Карского моря

Для проведения исследования климатической характеристики верхнего распреснённого слоя Карского моря были выбраны данные о солёности воды и сплочённости льда в виде 7 зональных разрезов различной протяжённости (рисунок 2.1):

- 1-й разрез от восточного побережья архипелага Новая Земля до западного побережья полуострова Ямал (72.33° с. ш., 55.92° в. д. – 72.33° с. ш., 68.33° в. д.).
- 2-й разрез от восточного побережья архипелага Новая Земля до острова Белый (73.50° с. ш., 57.83° в. д. – 73.50° с. ш., 70.50° в. д.).
- 3-й разрез от острова Белый до острова Диксон (73.50° с. ш., 70.50° в. д. – 73.50° с. ш., 80.50° в. д.).
- 4-й разрез от восточного побережья архипелага Новая Земля до западного побережья полуострова Таймыр (устья реки Пясины) (74.33° с. ш., 59.67° в. д. – 74.33° с. ш., 85.67° в. д.).
- 5-й разрез от восточного побережья архипелага Новая Земля до западного побережья полуострова Таймыр (74.83° с. ш., 61.33° в. д. – 74.83° с. ш., 84.83° в. д.).
- 6-й разрез от восточного побережья архипелага Новая Земля до западного побережья полуострова Таймыр (75.58° с. ш., 66.17° в. д. – 75.58° с. ш., 89.50° в. д.).
- 7-й разрез от северного побережья архипелага Новая Земля до северного побережья полуострова Таймыр (76.67° с. ш., 69.33° в. д. – 76.67° с. ш., 100.33° в. д.).

Разрезы были выбраны для отслеживания динамики распреснённого слоя в Карском море, который, по исследованиям многих специалистов, может

распространяться далеко на восток к проливу Вилькицкого, а также на север и на запад на значительные расстояния.

Временной диапазон исследования начинается с января 1993 года до декабря 2019 года. Для данных солёности разрезы включают измерения на следующих горизонтах: 0.49, 1.54, 2.65, 3.82, 5.08, 6.44, 7.93, 9.57, 11.40, 13.47, 15.81, 18.50, 21.60, 25.20, 29.44, 34.43, 40.34, 47.37, 55.76, 65.81, 77.85, 92.33, 109.73, 130.67, 155.85, 186.30, 222.48, 266.04, 318.13, 380.21, 453.94 м.

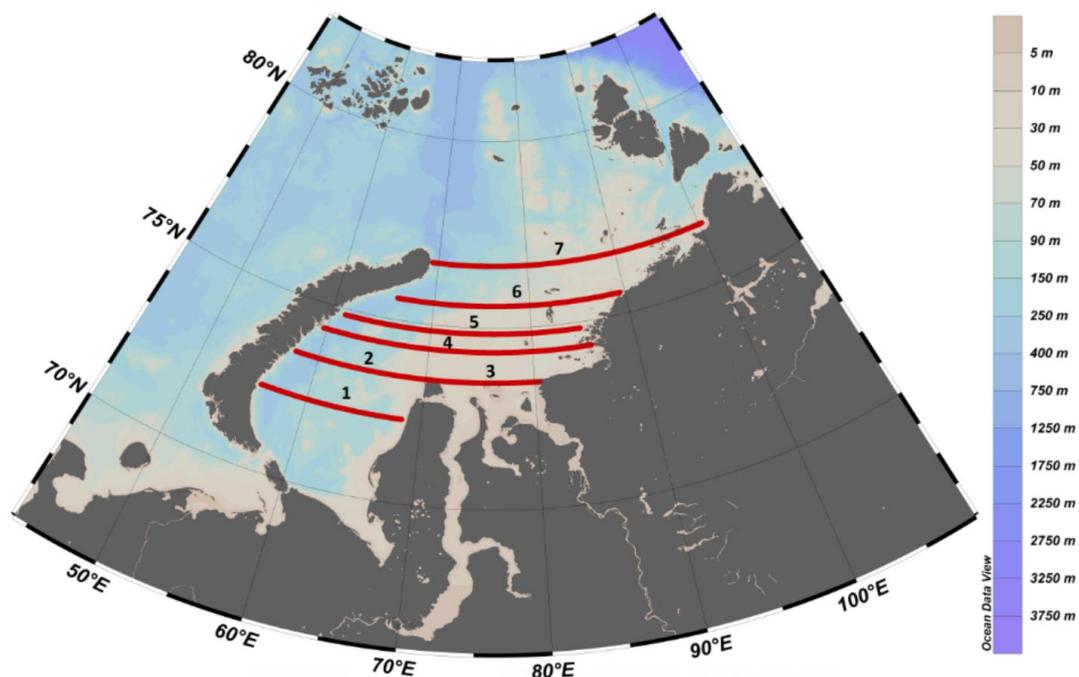


Рисунок 2.1 – Карта и нумерация исследуемых разрезов в Карском море.

2.2.2. Данные расхода стока Оби и Енисея

Для выявления максимумов значений расхода стока и объёма воды, попавшего в Карское море из рек Оби и Енисея, а также длительности их половодий, были взяты данные с сайта обсерватории главнейших рек Арктики с помощью интерактивных диаграмм. Гидрографическая станция Оби – пункт Салехард, Енисея – пункт Игарка [23].

Информация, представленная в виде ежесуточных значений, были усреднены до среднегодовых годовых значений во время половодья.

2.3. Методика выполнения работы

2.3.1. Кластерный анализ

В качестве обработки данных был применён многомерный статистический анализ, а именно кластерный анализ – метод автоматической классификации (разбиение полученных значений солёности на ряд подмножеств (классов) по признаку их сходства, в нашем случае, близкая по значениям солёность) [20].

Кластерный анализ выполнялся методом Уорда с евклидовой метрикой, что позволяет отнести к одному классу точки с одинаковой величиной характеристики.

Кластеризация была произведена с помощью языка программирования Python в среде Jupyter Notebook (веб-приложение для создания и обмена вычислительными кодами) с подключенным модулем Scikit-learn. Это модуль Python, объединяющий широкий спектр современных алгоритмов машинного обучения для средних контролируемых и неконтролируемых задач [21]. Код расчёта приведён в Приложении А.

Ряды солёности для каждой точки на разрезах и в каждый момент времени были проанализированы и разбиты на 6 классов данных. Из шести классов был выделен самый «пресный» класс, и далее по полученным данным была рассчитана средняя солёность этого класса для каждой точки пространства на разрезах за каждый момент времени, а также объём этого класса в кубических метрах.

Расчёт объёма был выполнен по формуле:

$$1852 * 60 * l * \cos \frac{\varphi\pi}{180} \quad (2.1),$$

где l – расстояние между точками сетки данных, которое составляет 0.083° ;

φ – широта места в градусах (в зависимости от разреза);

численные коэффициенты 1852 и 60 обозначают количество метров в одной морской миле и количество минут в градусе долготы соответственно.

Далее полученное число умножалось на толщину слоя в зависимости от горизонтов наблюдений.

Расчёт объёма пресных вод, попавших в море во время половодья Оби и Енисея производили по формуле:

$$60 * 60 * 24 * S * N \quad (2.1),$$

где 60 и 24 – коэффициенты для нахождения секунд в сутках;

S – сумма стока половодья в м³/с;

N – продолжительность половодья в сутках.

2.3.2. Одномерная статистика

В качестве метода исследования и обработки информации применяется одномерная статистика:

- расчёт трендовой составляющей;
- гармонический анализ Фурье и расчёт периодограммы;
- корреляционный и взаимокорреляционный анализы.

Корреляционный анализ предоставляет информацию о наличии, либо же отсутствии связи между двумя характеристиками. Коэффициент корреляции R характеризует степень тесноты линейной зависимости между переменными, но при всём при этом не определяет причинно-следственных отношений между ними. Проверка R на значимость необходима для подтверждения существования между двумя переменными статистически значимой прямой или обратной связи посредством сравнения критического t-критерия Стьюдента с эмпирическим его значением, которое рассчитывается по формуле:

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

где σ_R – средняя квадратическая погрешность расчёта коэффициента корреляции;

N – длина исходного ряда данных.

В случае превышения эмпирического критерия над критическим ($t_{\text{крит.}}$ по уровню значимости $p = 0.05$ и числу степеней свободы $\nu = N-2$) наличие связи между параметрами доказано, анализируемые величины в той или иной степени влияют друг на друга [22].

Расчёт трендовой составляющей необходим для оценки стационарности, т.е. неизменности основных статистических характеристик временных рядов. Сам по себе тренд – некоторое медленное изменение процесса без образования циклов. Он отражает наличие во временной изменчивости длиннопериодного колебания с периодом, существенно превышающим длину выборки.

В работе были рассчитаны оба вида тренда (линейный и квадратичный). Первый находится по уравнению линейной регрессии:

$$y = a_1 t + b + \xi,$$

второй – по модели множественной регрессии:

$$y = a_2 t^2 + a_1 t + b + \xi,$$

где t – исходный ряд времени;

a_2 и a_1 – коэффициенты регрессии;

b – свободный член;

ξ – отклонения от прямой.

Для проверки значимости трендовых составляющих применяется оценка значимости коэффициента корреляции R и корреляционного отношения η в случае линейного и квадратичного трендов соответственно. При условии же значимости коэффициентов можно говорить об определённом вкладе тренда в общую дисперсию (среднюю изменчивость) ряда [22].

Взаимнокорреляционный анализ, или кросскорреляция – это корреляция двух статистических рядов друг с другом при разных временных сдвигах. График зависимости коэффициентов кросскорреляции $r_{xy}(\tau)$ от сдвигов во времени τ – есть взаимнокорреляционная функция (ВКФ). Уровни значимости ВКФ, т.е. критические значения коэффициентов взаимной корреляции, можно вычислить по следующей формуле:

$$r_{\text{крит.}}(\tau) = \frac{-\sqrt{N-\tau-1} + \sqrt{N-\tau-1+4t_{\text{крит.}}^2}}{2t_{\text{крит.}}},$$

где N – длина реализации,

τ – сдвиг ВКФ,

$t_{\text{крит.}}$ (при уровне значимости 0.05 и числу степеней свободы $\nu = N - \tau - 1$) – критерий Стьюдента.

Рассчитанные критические значения наносятся на график и показывают зону значений $r_{xy}(\tau)$, статистически равных нулю. По ВКФ выявляются такие параметры, как оценка асинхронной связи между двумя характеристиками, а также направление запаздывания [22].

Гармонический анализ представляет собой разложение в ряд Фурье. В его основе лежит идея, что любой ряд можно разложить без остатка на конечное число гармоник (тригонометрических функций, имеющих периоды, кратные длине ряда). Для исходного ряда солёности вод Карского моря были рассчитаны следующие характеристики гармоник: 1) амплитуда гармоники:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2},$$

2) фаза гармоники:

$$\varphi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k},$$

3) вклад гармоники в общую дисперсию ряда:

$$V_k = \frac{D_k}{D_y}, D_k = \frac{A_k^2}{2},$$

где D_y – дисперсия исходного ряда значений солёности;

где a_k и b_k – коэффициенты Фурье.

Непосредственно гармоника вычисляется по формуле:

$$G_k = A_k \cos(\omega_k t - \varphi_k),$$

где ω_k – частота, равная $2\pi/T$.

В работе для нахождения периодов гармоник с помощью программного обеспечения Past 3 строились периодограммы (спектры), на которых показана зависимость дисперсии гармонических составляющих от их частоты. Для дальнейшего гармонического анализа были выявлены значения частоты, которые соответствуют выделяющимся «пикам» с наибольшей дисперсией [20].

R^2 , как и коэффициент корреляции, может быть проверен на значимость. При проверке можно сделать заключение о значительном или незначительном вкладе гармоники в дисперсию ряда значений солёности.

Глава 3. Выявление климатической изменчивости верхнего распреснённого слоя Карского моря

3.1 Обнаружение пространственных границ верхнего распреснённого слоя Карского моря

Верхний сезонный распреснённый слой Карского моря – это один из важнейших факторов формирования его гидрологического режима данной акватории. Этот слой, главным образом, формируется за счёт огромного речного стока, поступающего в море, а также за счёт климатических и ледовых условий данной части Мирового океана. Обширный распреснённый слой формирует неоднородную стратификацию водной толщи, которая, в основном, подразделяется на две важные части: сам распреснённый, относительно тёплый, богатый взвесью слой, он же плюм, обособленный от холодных, солёных, нижележащих вод моря, которые составляют вторую часть водной толщи. Плюм является основным связующим звеном между материковыми и океаническими природными системами в море.

Для того, чтобы визуальнo отследить зависимость распределения солёности в Карском море от объёма речного стока, поступающего в море из рек Обь и Енисей в определённый сезон года, а также динамику плюма в водной толще, были построены семь разрезов солёности моря в программе Panoply на примере 2003 года по данным реанализа морской службы Copernicus (рисунки 3.1-3.7). По данным исследования [24] максимальные значения расхода рек Оби и Енисея приходятся на июнь, а минимальные – на март-апрель, поэтому, для выявления сезонных отличий в значениях солёности, разрезы построены для четырёх месяцев в году (февраль, апрель, июль, октябрь). Глубина разрезов составляет 30 метров, так как глубже этой отметки, верхний распреснённый слой не распространяется.

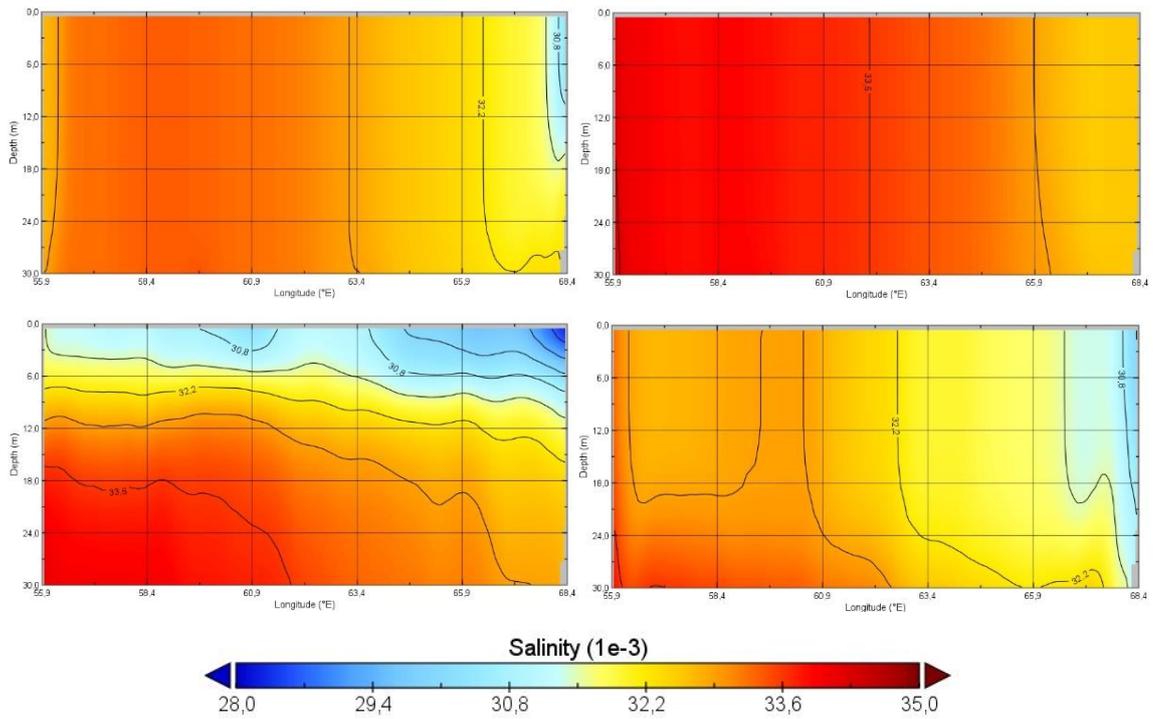


Рисунок 3.1 – Распределение солёности на разрезе 1 за 2003 год для января (сверху слева), апреля (сверху справа), июля (снизу слева), октября (снизу справа).

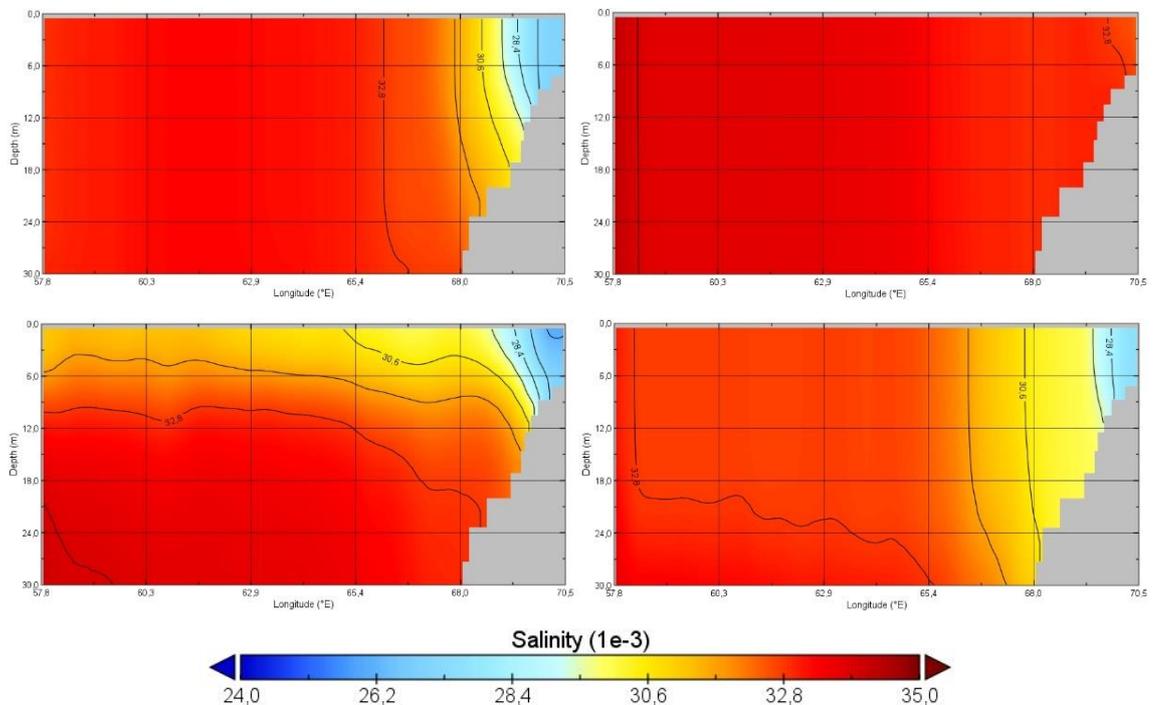


Рисунок 3.2 – Распределение солёности на разрезе 2 за 2003 год для января (сверху слева), апреля (сверху справа), июля (снизу слева), октября (снизу справа).

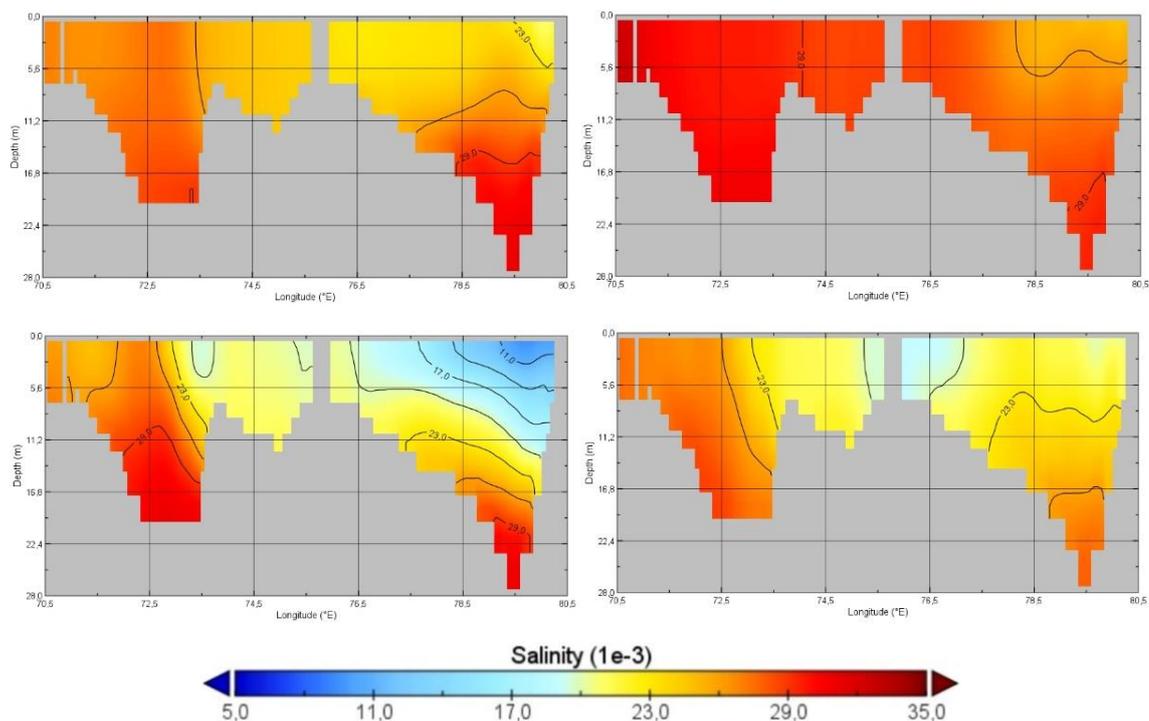


Рисунок 3.3 – Распределение солёности на разрезе 3 за 2003 год для января (сверху слева), апреля (сверху справа), июля (снизу слева), октября (снизу справа).

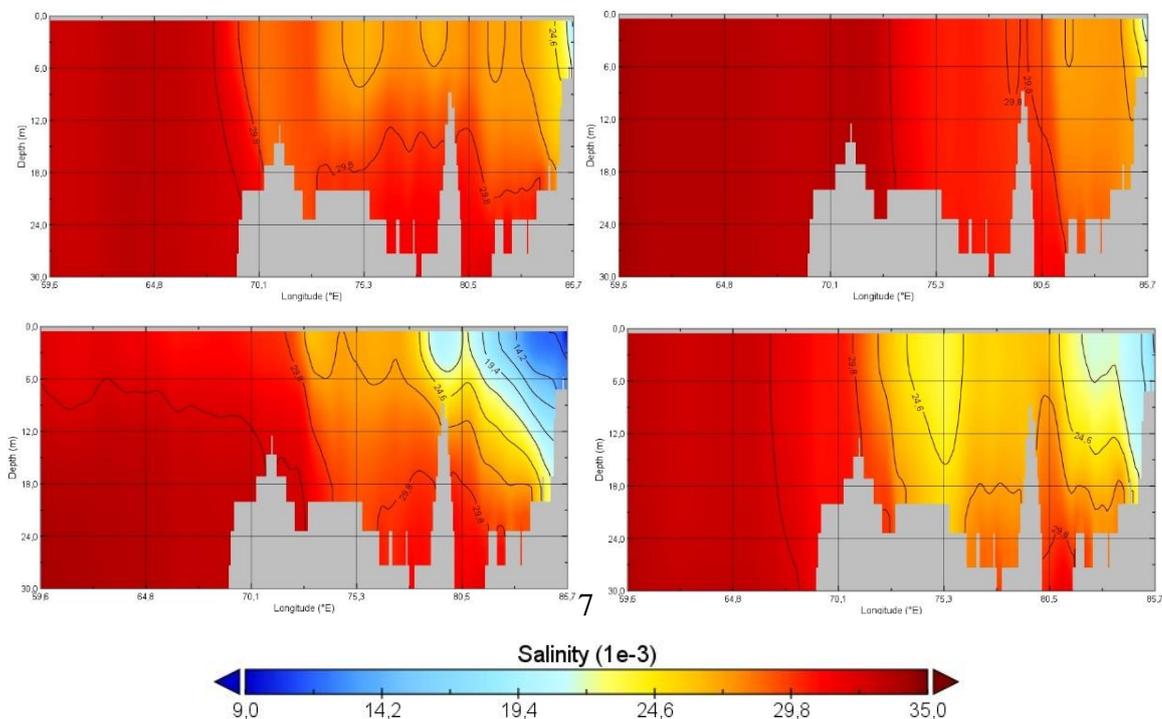


Рисунок 3.4 – Распределение солёности на разрезе 4 за 2003 год для января (сверху слева), апреля (сверху справа), июля (снизу слева), октября (снизу справа).

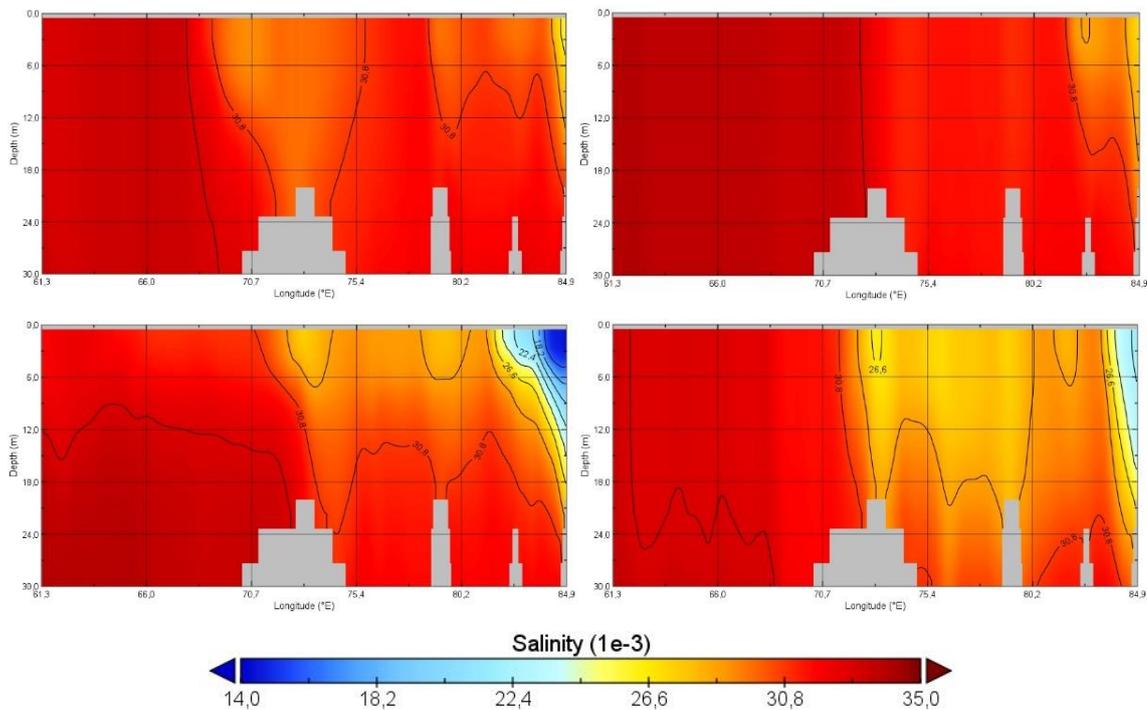


Рисунок 3.5 – Распределение солёности на разрезе 5 за 2003 год для января (сверху слева), апреля (сверху справа), июля (снизу слева), октября (снизу справа).

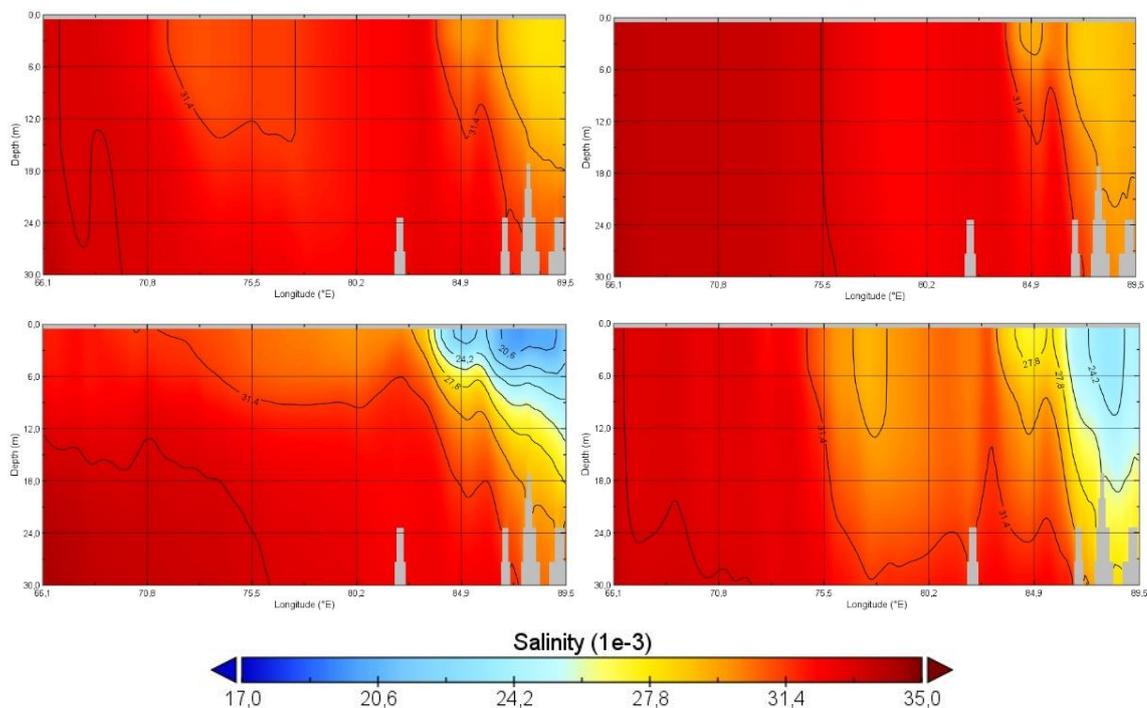


Рисунок 3.6 – Распределение солёности на разрезе 6 за 2003 год для января (сверху слева), апреля (сверху справа), июля (снизу слева), октября (снизу справа).

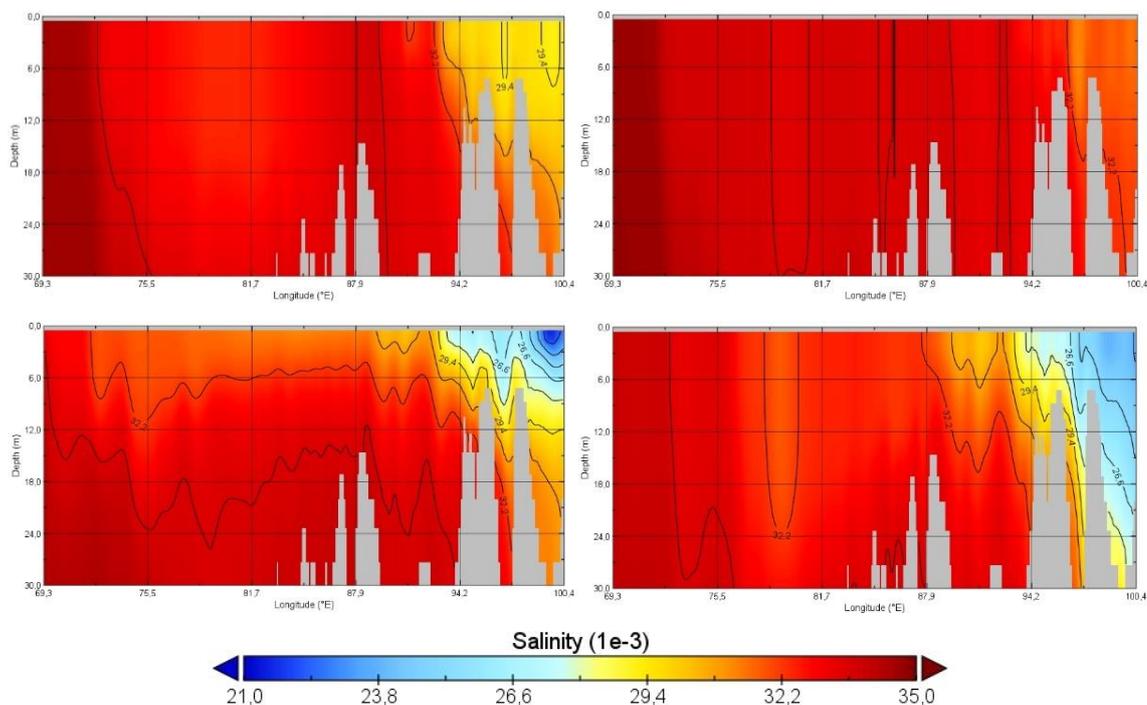


Рисунок 3.7 – Распределение солёности на разрезе 7 за 2003 год для января (сверху слева), апреля (сверху справа), июля (снизу слева), октября (снизу справа).

Полученные разрезы по данным солёности можно разделить на 2 группы: в зависимости от значений минимальной солёности и географического положения. Так, в первую группу войдут разрезы, где значение минимальной солёности не превышает 24‰ (граница распреснённые воды – морская вода), а располагаться они будут в восточном секторе Карского моря (восточнее полуострова Ямал), во вторую же группу войдут разрезы, где значение минимальной солёности которых превышает 24‰, а располагаться они будут в западной части Карского моря (западнее полуострова Ямал). Такое разделение позволяет более удобно описать динамические процессы, распространяющиеся от разреза к разрезу. Первая группа, разрезы 3, 4, 5, 6, 7. Вторая – 1 и 2 соответственно.

Так, для первой группы, по представленным распределениям солёности воды, можно судить о некоторой зависимости распространения верхнего распреснённого слоя на каждом из исследуемых участков: менее плотная и более

пресная водная масса смещается к восточной стороне акватории, примыкая к западному побережью близлежащих участков суши из-за воздействия на эти воды силы Кориолиса, которая играет важную роль в динамике речного плюма. На разрезе 3 виден сдвиг водной массы Оби на восток, в сторону Енисейского эстуария (приложение 1). Смещению же водной массы Енисея на восток препятствует западное побережье полуострова Таймыр, который направляет поток Енисейских вод прямо на север, где и происходит смешивание плюмов обеих рек [25].

По распределению солёности на 2003 год на третьем разрезе в восточной его части, даже в месяц с наибольшими значениями, данная характеристика не превышает 25‰, а в месяц с наименьшими значениями достигает 4.9‰, что обусловлено прохождением разрезом над мелководной зоной (28 метров) вблизи эстуариев обеих рек, где изменчивость гидрологической структуры водной массы будет наибольшей. Такое изменение солёности связано с летними половодьями, вызванными таянием материковых запасов снега и льда весной, которые создают большие объёмы, поступающих в реки стоков. Так как эстуарии рек находятся в северной части Евразии, необходимо время, чтобы тёплая талая вода попала в Арктику, что и объясняет минимум солёности летом, а не весной, когда наблюдается максимум солёности воды. Следует отметить, что более раннее появление распреснённой воды в восточной части разреза, вызвано тем, что Енисейские паводковые воды быстро проходят узкий Енисейский залив и беспрепятственно попадают в море уже а мае, чем в Обские воды, приходящие позже, которые вынуждены преодолевать широкую, протяжённую акваторию Обской губы, что и замедляет их появление в западной части разреза [24]. С уверенностью можно сказать о том, что Обские паводковые воды дошли до эстуария, судя по разрезу июля-месяца, где чётко прослеживается разделяющий солёный вертикальный слой между пресными ядрами восточной и западной частями разреза.

Четвёртый, пятый, шестой и седьмой разрезы проходят через всё Карское море, меняясь между собой широтой точек. На разрезах можно выделить

отдельные объёмы распреснённой воды, которых нет западнее 60° в. д. Можно отметить, что, чем дальше распреснённый объём воды, удалённый от источника, движется от самого южного третьего разреза до самого северного седьмого разреза, тем большую горизонтальную протяженность с востока на запад этот объём занимает, и тем меньше становится глубина залегания галоклина. Это связано с естественным гидродинамическим растеканием жидкости с малой плотностью на поверхности жидкости с более высокими значениями плотности, а также за счёт влияния ветров переменных направлений над акваторией Карского моря. Тем не менее, основной объём распреснённой водной массы, стремится сконцентрироваться вдоль западных побережий материка.

Отличительной чертой второй группы разрезов, является то, что солёность воды не достигает таких низких значений, как в первой группе, а также объём распреснённой воды на этих разрезах не только стремится занять восточное положение разреза, но в некоторые месяцы распространяется практически равномерно вдоль всей протяжённости разреза, что хорошо видно особенно в летние месяцы. Такое распределение распреснённого объёма воды, скорее всего, обуславливается не только наличием к востоку эстуария Оби, из которого опреснённые водные массы узкой полосой двигаются на юг вдоль западных берегов полуострова Ямал от второго разреза к первому, но и влиянием других факторов, например, распреснением, вызванным летним таянием льда вдоль всей протяжённости разрезов.

По результатам построенных разрезов для каждого из исследуемых участков можно отметить, что распространение верхнего распреснённого слоя в Карском море проявляется не только в северо-восточных направлениях к проливу Вилькицкого, но и северных направлениях, где, скорее всего, преобладает плюм Оби, а также и южных направлениях вдоль полуострова Ямал. Месяцами с максимальным объёмом распреснённой водной массы для каждого разреза обычно является июль-август, а с минимальным объёмом – март-апрель.

3.2 Выделение климатической изменчивости распреснённого слоя Карского моря

Для дальнейшего анализа климатической изменчивости верхнего распреснённого слоя Карского моря с данными разрезов 1-7 был проведён кластерный анализ, разделивший массив данных для каждого из исследуемых участков на 6 классов, в зависимости от значения океанологической характеристики. Для дальнейшей работы от каждого разреза был выбран класс, содержащий минимальные значения солёности, а также вычислен объём занимаемых этим классом вод. Для удобства этот класс в работе будем обозначать «КСМС» - класс, содержащий минимальные значения солёности.

Для того, чтобы отследить динамику изменений значений солёности во времени для КСМС были построены диаграммы Ховмёллера. Эти диаграммы показывают распределение солёности в зависимости от месяца и конкретного года (рисунки 3.8-3.10).

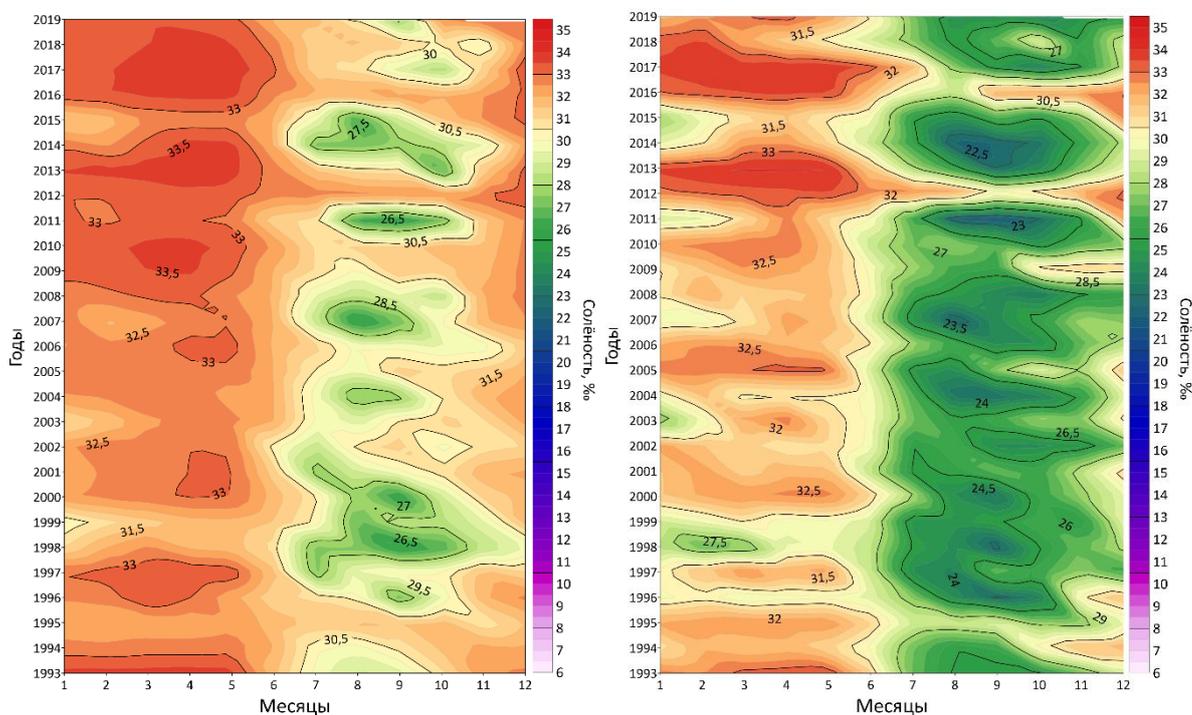


Рисунок 3.8 – Диаграмма Ховмёллера для разреза 1 (слева) и разреза 2 (справа).

Изображено распределение характеристики для КСМС.

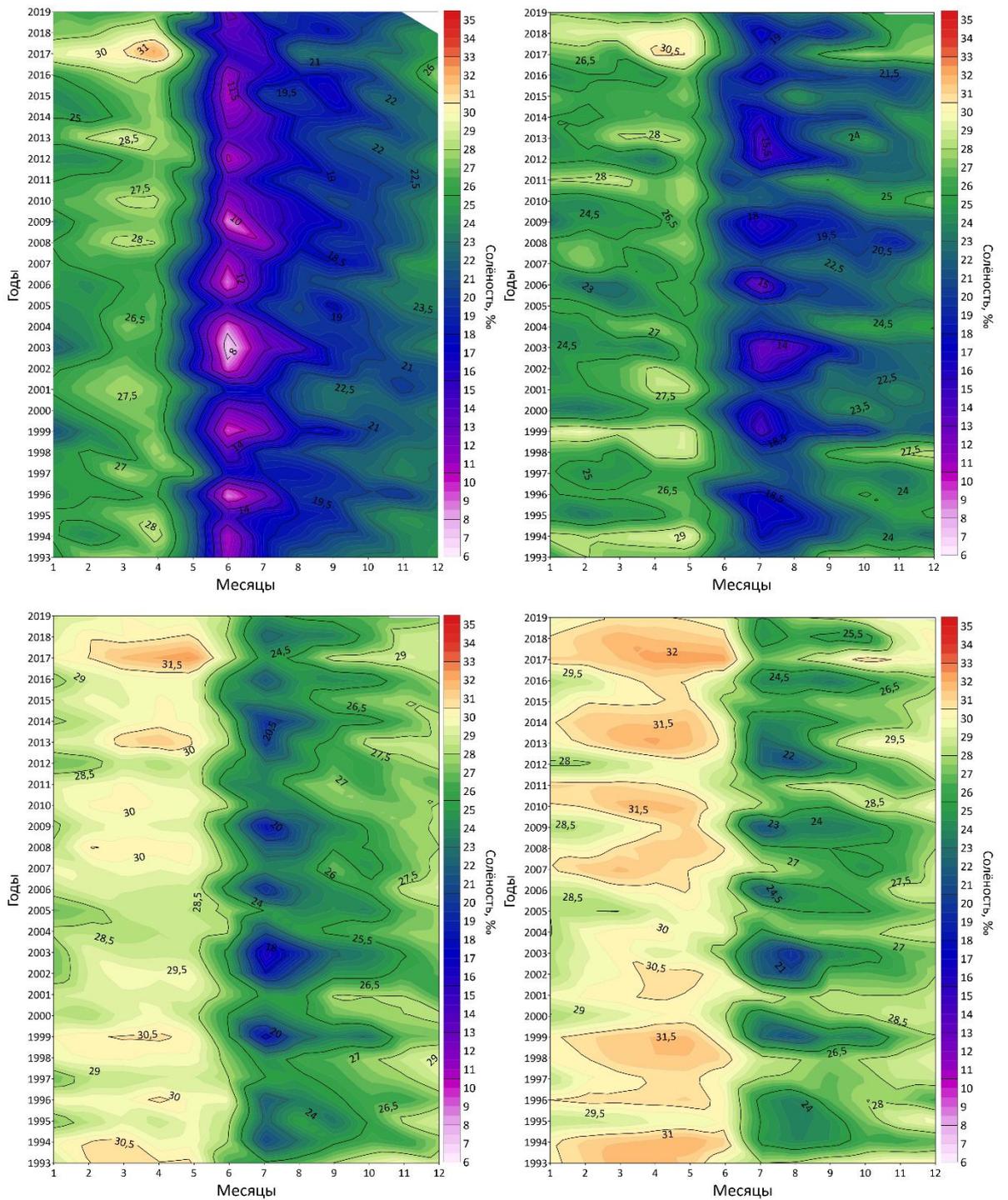


Рисунок 3.9 – Диаграмма Ховмёллера для разреза 3 (сверху слева), 4 (сверху справа), 5 (снизу слева), 6 (снизу справа). Изображено распределение характеристики для КСМС.

мае – для четвёртого, пятого и шестого разрезов. Такое различие во времени прихода распреснённой речной воды между разрезами вызвано запаздыванием движения плюма по акватории Карского моря на северо-восток. Минимальные значения КСМС для третьего разреза составляют около 6‰, для четвёртого – 10‰, для пятого – порядка 15‰, а для шестого разреза – приблизительно 20‰. Таким образом, очевидна изменчивость солёности вод распреснённого слоя из-за, в большей степени, горизонтального, а также вертикального перемешивания водных масс в пространстве.

Разрез 7 достаточно отдалён к северу от основных речных эстуариев Карского моря, поэтому значения минимальной солёности в нём не достигают таких низких значений, как в предыдущих разрезах восточной части акватории и составляют около 23‰. Минимальные значения характеристики для разреза наступают чаще всего в июле, максимальные – в мае.

По построенным диаграммам солёности можно предположить, что для того, чтобы плюму проделать путь от эстуария Оби-Енисея до залива Толля на севере полуострова Таймыр, потребуется преодолеть расстояние порядка 700-800 км и потратить на это около 2-4 месяцев. Для удобного представления возможной трансформации верхнего распреснённого слоя Карского моря были построены осреднённые изогалинные карты (зелёная линия, соответствует 25‰, синяя линия – 15‰ (рисунок 3.11). Построенные карты отображают усреднённое за период с 1993 по 2019 годы изменение солёности за июнь, июль, август и сентябрь, так как в эти месяцы происходят половодья на Сибирских реках.

Данные рисунки демонстрируют постепенное увеличение протяжённости обеих изогалин на север и восток с течением времени половодья. Следует отметить то, что в августе изогалина 25‰ отклоняется к северу по сравнению со своим июльским положением. Такое изменение положения, возможно, связано с поступлением большего объёма пресных вод из рек, что способствует их накоплению в юго-восточной части моря. Далее накопленный объём из-за воздействующих на поверхностный слой физических процессов, таких как

течения и ветер, преимущественно переносится на северо-восток, отклоняя направление изогалины 25‰ в северо-восточном направлении.

Следует отметить, что данные карты распределения солёности очень приближённо показывают реальное положение изогалин в море. Год от года их положения постоянно меняются, могут раздваиваться в связи с топографией дна или вообще отсутствовать.

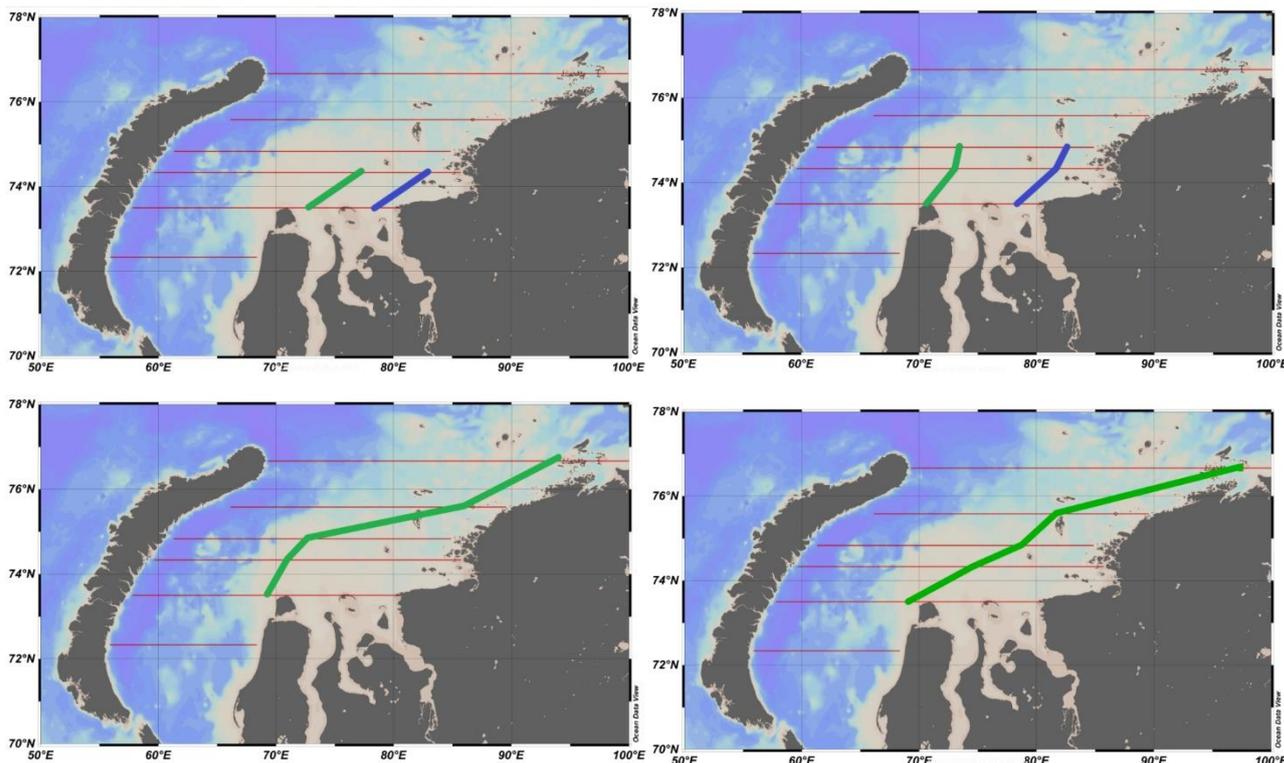


Рисунок 3.11 – Осреднённые за период с 1993 по 2019 годы изогалинные карты Карского моря для июня (сверху слева), июля (сверху справа), августа (снизу слева) и сентября (снизу справа). Зелёная линия соответствует изогалине 25‰, а синяя – 15 ‰.

Для отслеживания динамики изменений значений объёма КСМС во времени также были построены диаграммы Ховмёллера, показывающие распределение объёма в зависимости от месяца и года (рисунки 3.12-3.13).

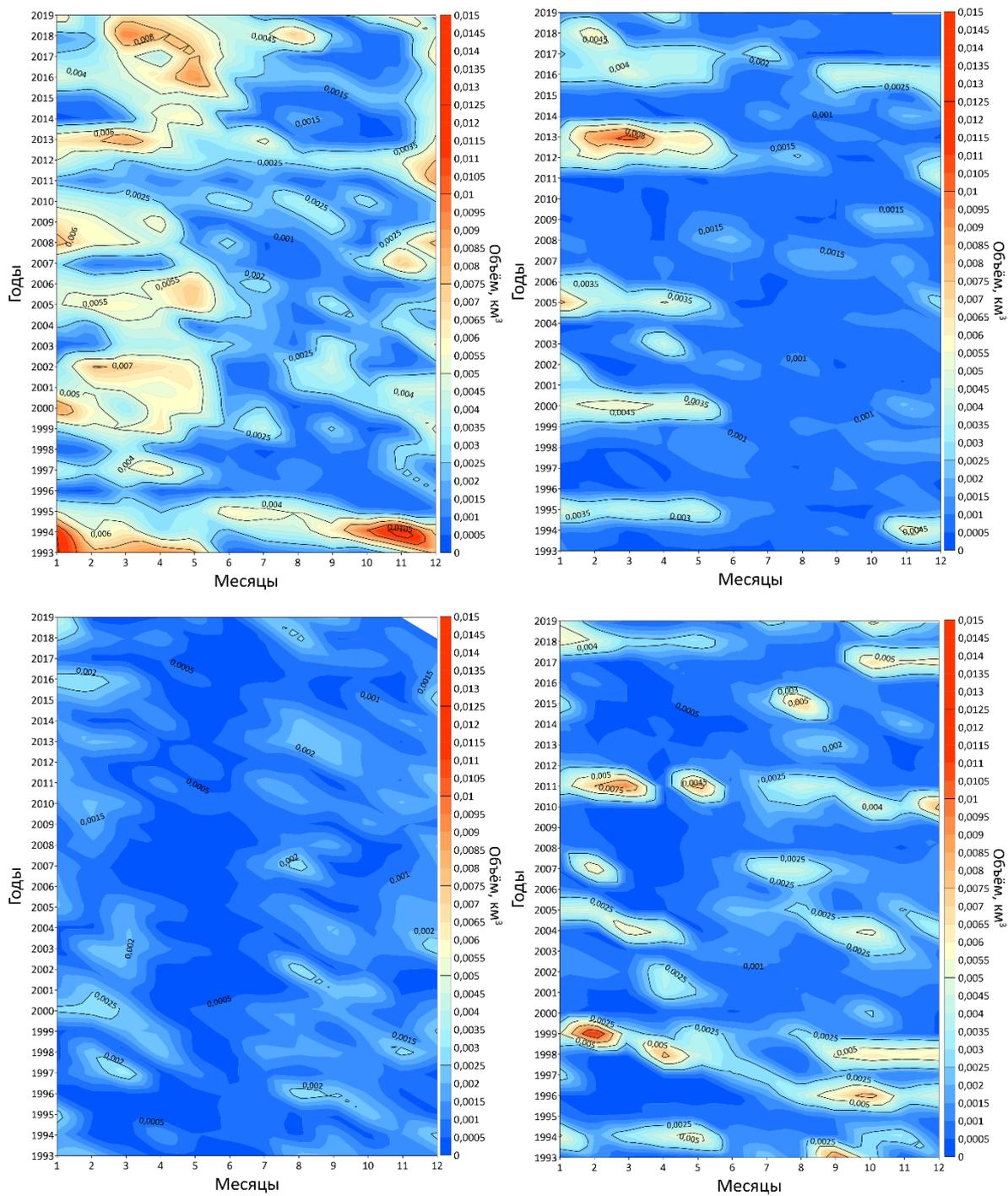


Рисунок 3.12 – Диаграмма Ховмёллера объёма КСМС для разреза 1 (сверху-слева), разреза 2 (сверху-справа), 3 (снизу слева) и 4 (снизу справа).

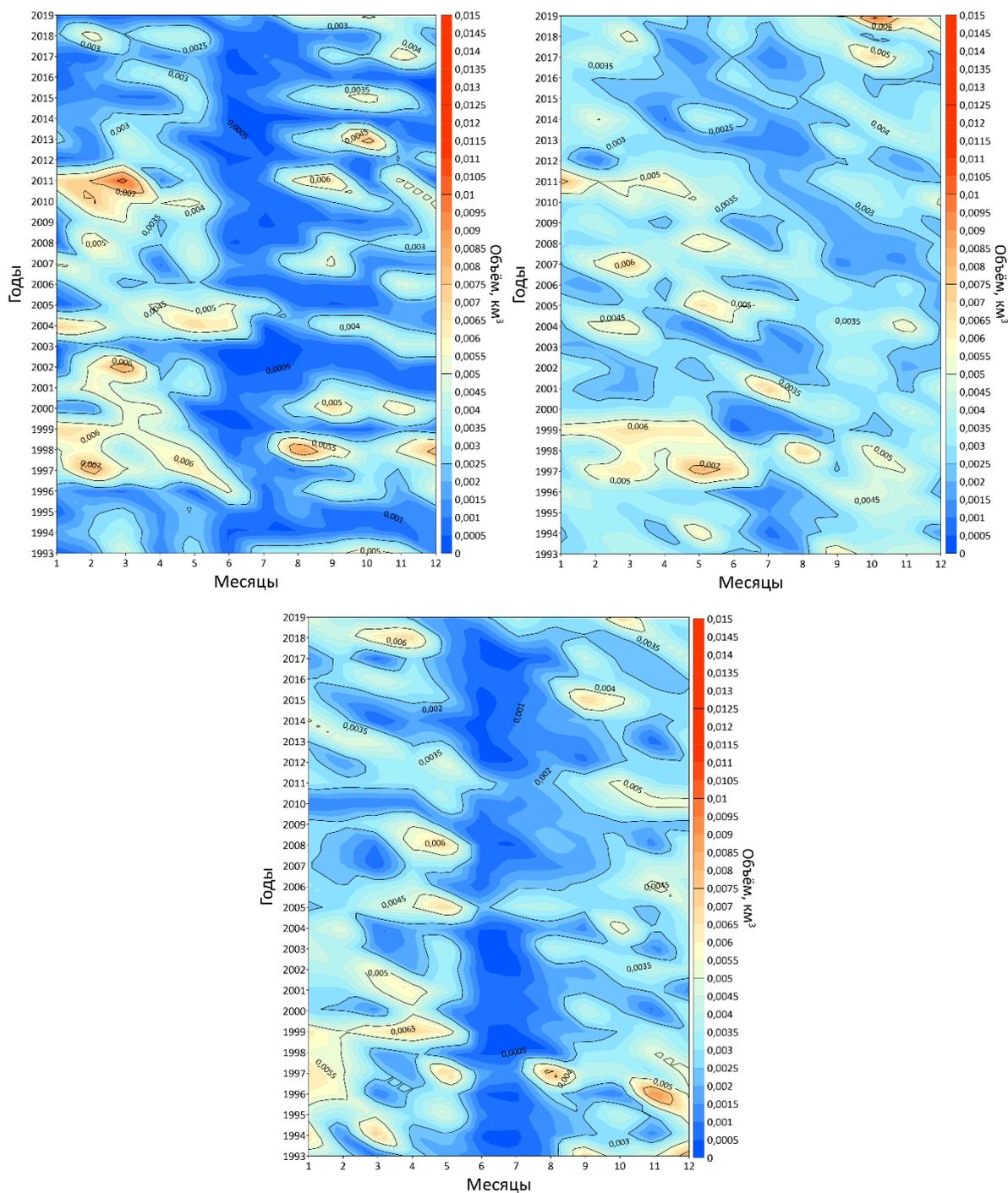


Рисунок 3.13 – Диаграмма Ховмёллера КСМС для разреза 5 (сверху-слева), разреза 6 (сверху-справа) и 7 (снизу).

Главной особенностью построенных диаграмм Ховмёллера является визуальная возможность отследить практически равномерные возможные циклические колебания солёности с периодом около двух-трёх лет. Так годы, на протяжении которых наблюдалась повышенная солёность по сравнению с предыдущим годом, сменяются одним-двумя годами с пониженной солёностью

и наоборот. Также следует отметить прямую зависимость степени показателей солёности зимних и весенних месяцев от степени распреснения воды в летние месяцы половодья, другими словами, чем больший объём пресных вод попал из рек в море, тем больший объём распреснённых вод он образовал, и тем больше он обеспечил следующий сезон распреснённой водой. Если же летние паводки были не слишком сильными и продолжительными, то в этот год вода успеваеет лучше перемешаться с солёной нижележащей водной толщей и обеспечить следующий год солёной водой.

По построенным диаграммам объёма КСМС можно увидеть, что, как и в случае с диаграммами солёности, величина объёма меняется циклически, причём с той же периодичностью, что и у солёности. Это особенно хорошо видно на диаграммах разрезов 4, 5, 6 и 7. Также заметно, как происходит накопление объёма КСМС к концу лета – началу осени, что непосредственно связано с сезонным половодьем изучаемой акватории и уменьшением объёма перед половодьем. Вследствие этого, на диаграммах образуются «полосы» малых значений объёма, проходящие через центр диаграммы сверху вниз, обозначая своё проявление на периоды, когда новая опреснённая вода ещё не пришла с юга. Диаграмма третьего разреза не показывает таких отличительных особенностей, предположительно из-за того, что воды данного участка постоянно подвержены распреснению, так как он расположен в непосредственной близости от эстуариев Оби и Енисея.

Ещё одной особенностью диаграмм Ховмёллера является преимущество перед усреднённым графиком внутригодового хода характеристик, так как усреднять значения за многолетний период неправильно. Такой график мог бы привести к неверному выбору месяцев с максимальными и минимальными значениями КСМС.

3.3 Обнаружение связи между сезонными изменениями солёности КСМС

На основе этого предположения было решено определить наличие или отсутствие связи климатической изменчивости солёности между месяцами, когда наблюдаются минимальные и максимальные значения исследуемой характеристики. Чтобы выяснить это, была рассчитана взаимнокорреляционная функция (ВКФ) для каждого из месяцев исследуемых мест (рисунки 3.14-3.15). Характеристики рассчитанных ВКФ представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики рассчитанных ВКФ, между месяцами с максимальными и минимальными значениями солёности КСМС.

№ разреза	Месяц, имеющий наибольшие значения солёности самого пресного класса	Месяц, имеющий наименьшие значения солёности самого пресного класса	Сдвиг τ	Коэффициент корреляции $r(\tau)$	$r_{\text{крит}}(\tau)$	$-r_{\text{крит}}(\tau)$
1	Май	Август	0	0.42	0.35	-0.35
2	Май	Август	0	0.46	0.35	-0.35
3	Апрель	Июнь	-	Близкая связь отсутствует	-	-
4	Май	Июль	-	Близкая связь отсутствует	-	-
5	Май	Июль	-	Значимых нет	-	-
6	Май	Август	-	Значимых нет	-	-
7	Май	Июль	-	Значимых нет	-	-

Существование близкой связи между значениями месяцев с максимальной и минимальной солёностью обнаружено только у первого и второго разрезов. Связь между ними является синхронной, то есть колебания параметра происходят одновременно, так как на обеих ВКФ присутствует один значимый коэффициент корреляции на сдвиге $\tau = 0$. На остальных разрезах близкой связи между значениями солёности месяцев не обнаружено или связи нет вообще, так как на графике ВКФ нет значимых коэффициентов корреляции. Возможно связь, возникающая между значениями солёности самого пресного и солёного месяцев КСМС на первом и втором разрезах, вызвана отсутствием такого сильного

распреснения, как на остальных участках: так на исследуемую характеристику может влиять смещение значений параметра в сторону стандартной солёности Карского моря, а также ледовое распреснение, более мелкомасштабное и менее продолжительное, чем распреснение, вызванное реками Обь и Енисей.

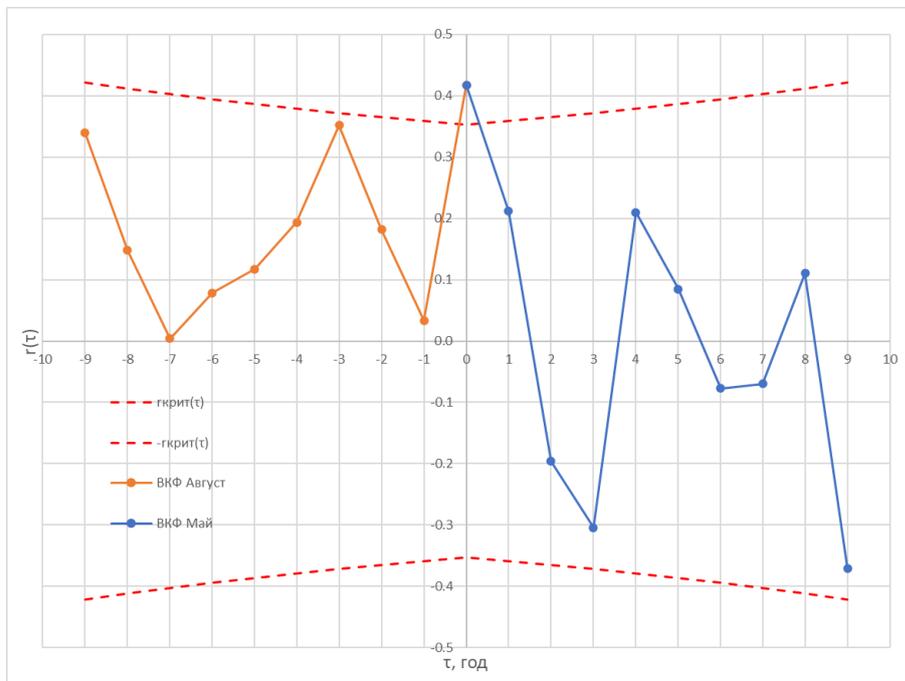


Рисунок 3.14 – ВКФ между значениями солёности мая и августа для первого разреза.

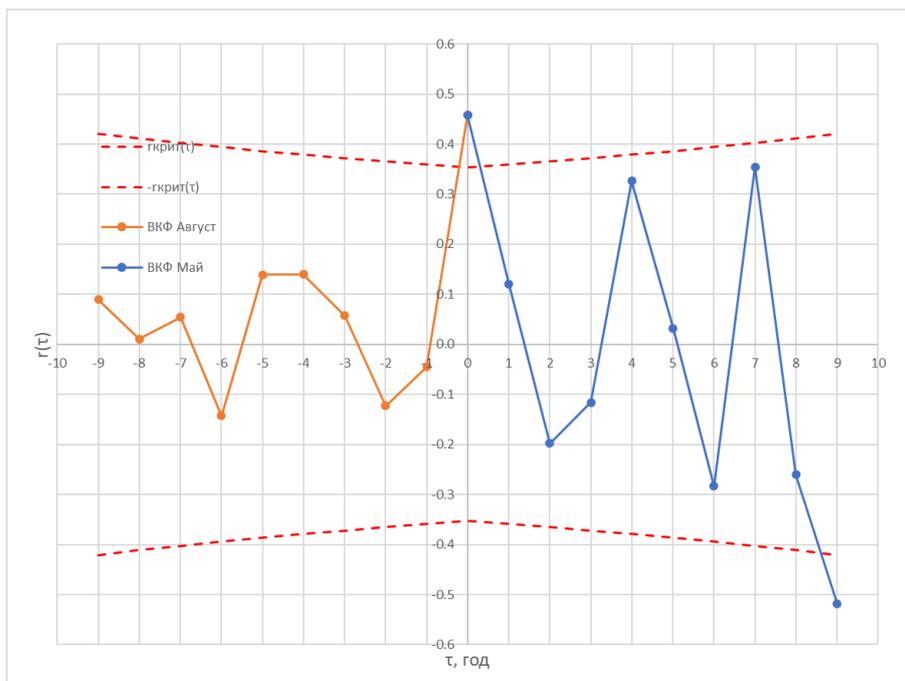


Рисунок 3.15 – ВКФ между значениями солёности мая и августа для второго разреза.

Также необходимо выяснить, меняются ли основные статистические характеристики каждого из рядов во времени, то есть оценить их стационарность. Для этого рассчитываются тренды для имеющихся рядов данных. Так, для каждого из рядов для «солёного» и «пресного» месяцев был рассчитан линейный и квадратичный тренды.

Характеристики значимых трендов представлены ниже в таблице 3.2. Особенностью полученных трендов является тот факт, что тренды являются значимыми только для месяцев, имеющих наибольшую солёность КСМС, тем самым обозначая то, что наличие во временной изменчивости исследуемой характеристики во времени длиннопериодного колебания относится лишь к месяцам с высокой минимальной солёностью. Графики изменения характеристик во времени с их линейными и нелинейными трендами представлены на рисунках 3.16-3.19.

Таблица 3.2– Характеристики значимых трендов для месяцев с минимальной и максимальной солёностью КСМС.

№ разреза	Месяц	Тренд	Отношение к-та детерминации на корр. отн..
1	Май	$y=0.04x+32.47$	0.26
3	Апрель	$y=0.07x+26.44$	0.16
3	Апрель	$y=-0.25x^2+0.01x+28.01$	0.35
4	Май	$y=-0.25x^2+0.01x+28.28$	0.20
5	Май	$y=-0.19x^2+0.008x+30.35$	0.32

По рассчитанным коэффициентам детерминации R^2 и их нелинейным аналогам η^2 можно отметить, что вклад трендов в общую дисперсию рядов варьируется от 16% для линейного тренда третьего разреза до 35% для квадратичного тренда того же разреза. Трендовая компонента для каждого случая вносит определённый вклад в общую дисперсию исходных рядов солёности, так как t^* -критерий Стьюдента для всех случаев превышает $t_{крит.}$, величина которого составляет 2.06. У линейных трендов можно определить

величину изменения характеристики за год: для тренда первого разреза она составляет 0.04‰/год, а для третьего разреза – 0.07‰/год.

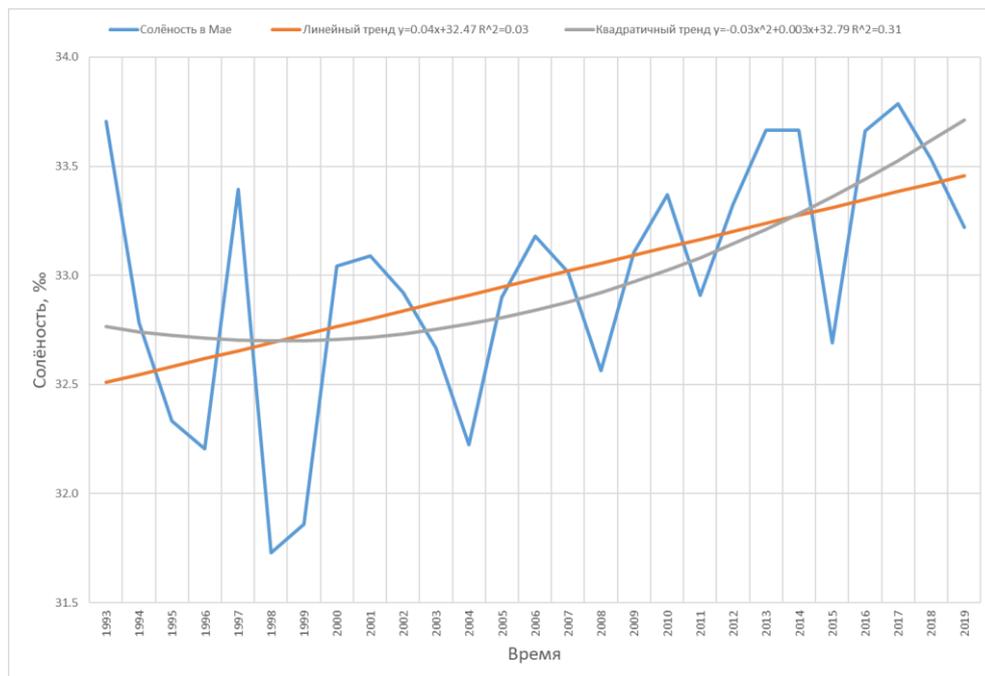


Рисунок 3.16 График хода значений солёности КСМС для первого разреза в мае и её линейный и нелинейный тренды.

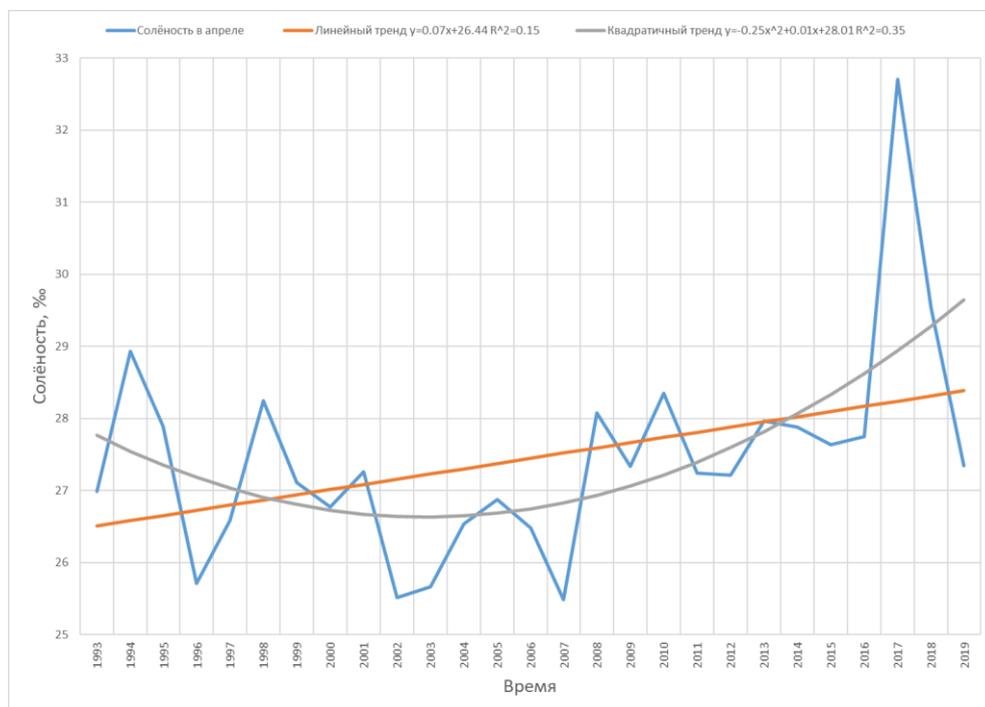


Рисунок 3.17 – График хода значений солёности КСМС для третьего разреза в апреле и её линейный и нелинейный тренды.

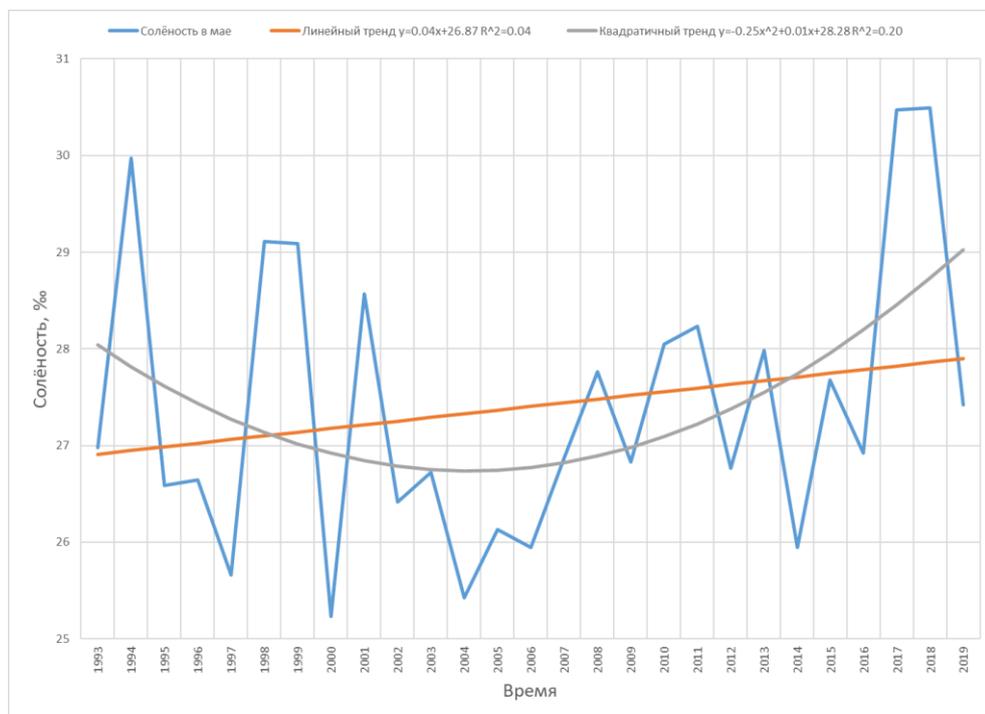


Рисунок 3.18 – График хода значений солёности КСМС для четвёртого разреза в мае и её линейный и нелинейный тренды.

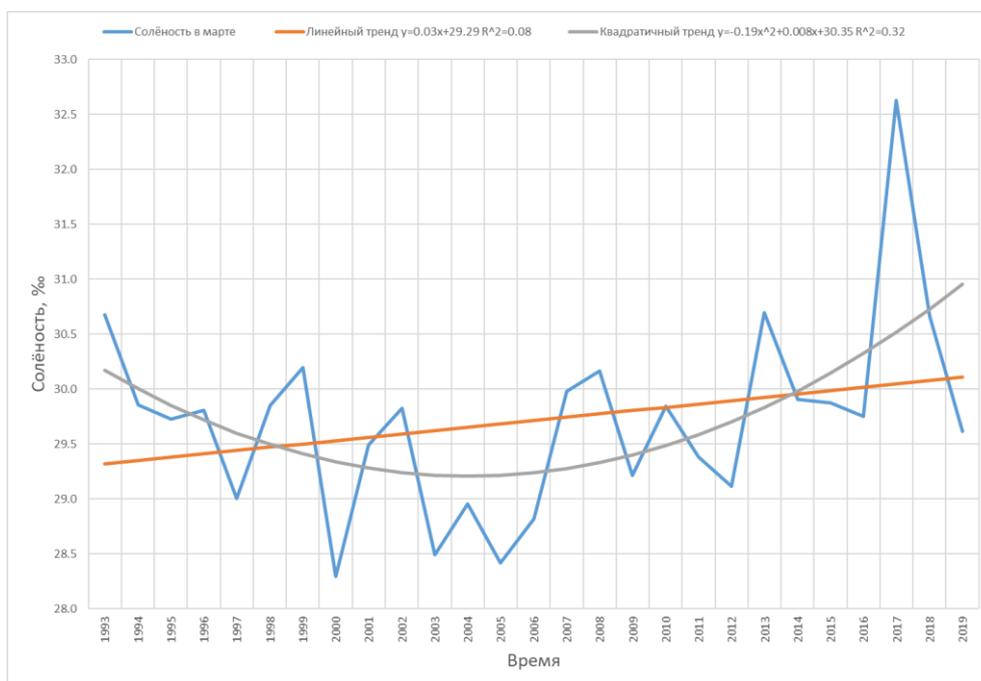


Рисунок 3.19 – График хода значений солёности КСМС для пятого разреза в мае и её линейный и нелинейный тренды.

Для дальнейшего статистического анализа из временных рядов тренд был удалён. Далее, для выявления во внутренней структуре временного ряда

циклических колебаний, был применён спектральный или гармонический анализ Фурье. С помощью программы «Past 4» было рассчитано разложение Фурье методом БПФ (быстрого преобразования Фурье). Характеристики полученных гармоник для каждого случая на разрезах представлены в таблице 3.3. Цветом в таблице выделены периоды гармоник, близкие друг к другу по значениям.

Таблица 3.3 – Характеристики гармоник, выявленных в КСМС после удаления тренда за период с 1993 по 2019 годы.

№ разреза	Месяц	Частота ω_k , 1/год	Период T_k , год	Амплитуда A_k , %	Вклад гармоники $V_k (R^2)$	Суммарный вклад $V_k (R^2)$	$t_{крит}$	t^*
1	Август	0.14	7.17	1.15	0.19	0.50	2.06	2.73
		0.28	3.59	1.44	0.30			3.95
	Май	0.25	4.00	0.41	0.39	0.67		5.08
		0.30	3.35	0.35	0.28			3.65
2	Август	0.28	3.53	1.83	0.34	0.34		4.39
	Май	0.25	3.92	1.10	0.37	0.37		4.85
3	Июнь	0.31	3.25	2.65	0.40	0.40		5.21
		0.26	3.85	1.54	0.13	0.94		2.08
	Апрель	0.31	3.25	3.81	0.80			23.00
4	Июль	0.29	3.47	2.38	0.30	0.30		3.88
		0.42	2.36	1.08	0.34	0.53	4.37	
	Май	0.26	3.85	0.82	0.19		2.71	
5	Июль	0.28	3.53	1.94	0.25	0.45	3.31	
		0.41	2.45	1.77	0.21		2.85	
	Май	0.21	4.84	0.48	0.22	0.52	3.03	
		0.33	3.06	0.55	0.29		3.84	
6	Август	0.29	3.41	2.19	0.35	0.35	4.55	
	Май	0.25	3.92	0.63	0.34	0.34	4.43	
7	Июль	0.23	4.29	1.28	0.31	0.31	4.07	
		0.42	2.39	0.66	0.34	0.54	4.46	
	Май	0.29	3.47	0.50	0.20		2.80	

Видно, что некоторые ряды имеют близкие по значениям периоды: 2.4 года, 3.4 года, 4.0 года. Такое совпадение периодов гармонических колебаний, вероятно, связано с естественными циклами солёности, меняющимися от сезона к сезону, о чём было сказано выше. Примеры спектрограмм представлены на рисунке 3.20 для августа месяца разреза 2 и мая месяца разреза 5. На рисунках отчётливо прослеживаются пики дисперсии гармонических составляющих, имеющих частоту 0.28 1/год для второго разреза и 0.21 1/год, 0.33 1/год.

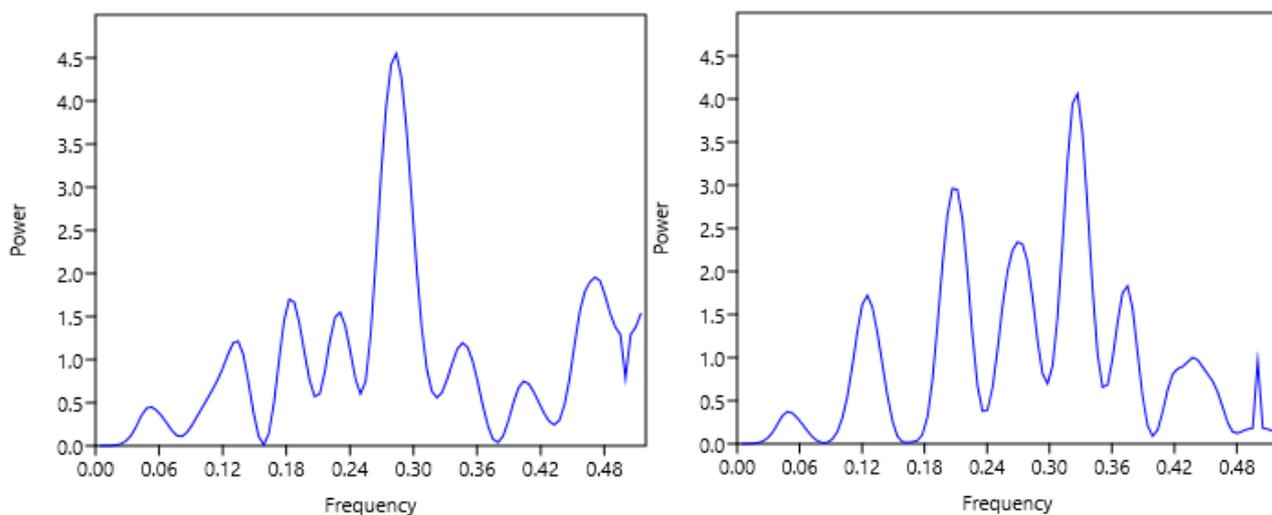


Рисунок 3.20 – Спектрограммы для августа месяца разреза 2 (слева) и мая месяца разреза 5 (справа).

Рассчитав вклад гармоник в общую дисперсию рядов и проверив коэффициенты корреляции на значимость, можно сделать вывод, что все выбранные гармоники значимы, то есть вносят определённый вклад в общие дисперсии исходных рядов солёности, так как все значения эмпирических значений t^* гармоник превышают значение $t_{\text{крит.}}$. Вклад в дисперсию рядов гармоник варьируется от 30% для гармоники июля месяца четвёртого разреза до 94% для апреля месяца третьего разреза. В среднем, вклад гармоник в общую дисперсию рядов составляет около 47%.

3.4 Обнаружение связей между сезонной солёностью КСМС и другими гидрометеорологическими параметрами.

На основе проделанного статистического анализа, выявившего связь между пресными и солёными месяцами некоторых разрезов, было решено выявить связь между этими же характеристиками и другими гидрометеорологическими параметрами, определяющими распределение поверхностного слоя воды: стоком рек Оби и Енисея, а также таяние льда.

Для этого из исходной базы данных был выбран массив данных о сплочённости льда на тех же разрезах и за тот же временной промежуток. Среднесуточные данные преобразованы в среднемесячные и отфильтрованы по сезонности: проводилось усреднение за зимние месяцы (декабрь-май), определяющие количество льда на разрезе, потенциально растаивающее следующим летом.

Сравнение также производилось с характеристиками рек Обь и Енисей: были получены данные о сумме стока во время половодий в м³/сек, об объёме поступивших в море вод в км³, а также о значениях максимального расхода реки в м³/сек для каждой из них в отдельности [23].

На основе этих данных проводился корреляционный анализ межгодовой изменчивости солёности КСМС «пресного» месяца и его объёма КСМС с суммами стоков Оби, Енисея, объёмами стоков Оби, Енисея, максимальными значениями стоков Оби, Енисея и сплочённостью льда на разрезах с первого по седьмой по отдельности. Результаты вычислений коэффициентов корреляции приведены в таблице 3.4. Значимые коэффициенты корреляции выделены зелёным цветом. Незначимые коэффициенты корреляции не обозначались, кроме тех, что возникли при проверке связи между солёностью пресного месяца КСМС на разрезе со сплочённостью льда на том же разрезе.

Таблица 3.4 – Значимые коэффициенты корреляции солёности КСМС для самого «пресного» месяца и других параметров. Зелёные квадраты показывают значимые коэффициенты корреляции, красные – незначимые (приведены для сравнения).

№ разреза	Пресный месяц	Сумма стока Оби	Макс значения стока Енисей	Макс значения стока Оби	Объём вод Енисей	Лёд на разрезе 1	Лёд на разрезе 2	Лёд на разрезе 3	Лёд на разрезе 4	Лёд на разрезе 5	Лёд на разрезе 6	Лёд на разрезе 7	Объём того же месяца
1	Солёность Август	-0.40	-0.45	-0.36	-0.37	-0.60	-	-	-	-	-	-	0.59
2	Солёность Август	-	-0.46	-0.37	-	-	-0.55	-	-	-	-	-	-
3	Солёность Июнь	-	-	-	-	-	-	-0.42	-	-	-	-	-
4	Солёность Июль	-	-	-	-	-	-	-	-0.01	-	-	-	0.65
5	Солёность Июль	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.16	-	-	0.61
6	Солёность Август	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.02	-	0.54
7	Солёность Июль	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.31	0.56

Проверка значимости проводилась по t-критерию Стьюдента, значение которого составляет 2.06 для данной длины ряда. Результаты поиска связи привели к следующим выводам: наиболее связан со стоком рек первый разрез, который, казалось бы, должен быть связан с ним меньше всего, так как находится в восточной части моря, где влияние распреснённых водных масс на солёность сказывается минимально. Наибольшее значение коэффициента корреляции, связывающего солёность КСМС первого разреза со стоком рек, приходится на связь исходной характеристики с максимальными значениями стока реки Енисей и составляет $R = 0.45$. Также, помимо первого разреза связь с речными процессами имеет солёность КСМС второго разреза, который также находится не на основном пути движения распреснённых водных масс.

Разрезы 3-7, находящиеся на вышеупомянутом пути, связи солёности с речными процессами не имеют. Такая особенность распределения связей, скорее всего, связана с изменением влияния на солёность западных разрезов КСМС, которые возникают на этих участках в результате преобладания опреснения воды из-за ледотаяния, а не распреснения вследствие прихода речных водных масс. Возникновение КСМС в результате таяния льда может совпадать с циклами половодий на реках, поэтому проявляется связь.

Также следует отметить, что связь сплочённости льда и солёности КСМС проявляется лучше всего на западных разрезах, где в процессах распреснения воды, возможно, преобладает таяние льда, а не речное распреснение. Зависимость солёности пресного месяца КСМС от сплочённости льда тем больше, чем дальше разрез находится к юго-западу от эстуария Оби-Енисея: солёность на третьем разрезе со сплочённостью льда на третьем разрезе имеют минимальный коэффициент корреляции $R = 0.42$, а солёность на первом разрезе со сплочённостью льда на первом разрезе наибольший $R = 0.60$. Такая связь характеризуется степенью влияния распреснённых водных масс на данные акватории. Остальные солёности разрезов 3-7 не имеют связи со сплочённостью льда, вероятно, потому что распреснённая вода, образовавшаяся в результате таяния льда, уносится именно с этих акваторий быстрее, чем туда придут воды половодий, а на западных разрезах такого быстрого сноса распреснённых вод не происходит.

Прямая связь солёности КСМС на разрезах обнаружилась с объёмами того же месяца КСМС, так как опреснение воды создаёт больший объём распресненной поверхностной водной массы. Примеры точечных диаграмм связи между параметрами приведены на рисунках 3.21-3.22.

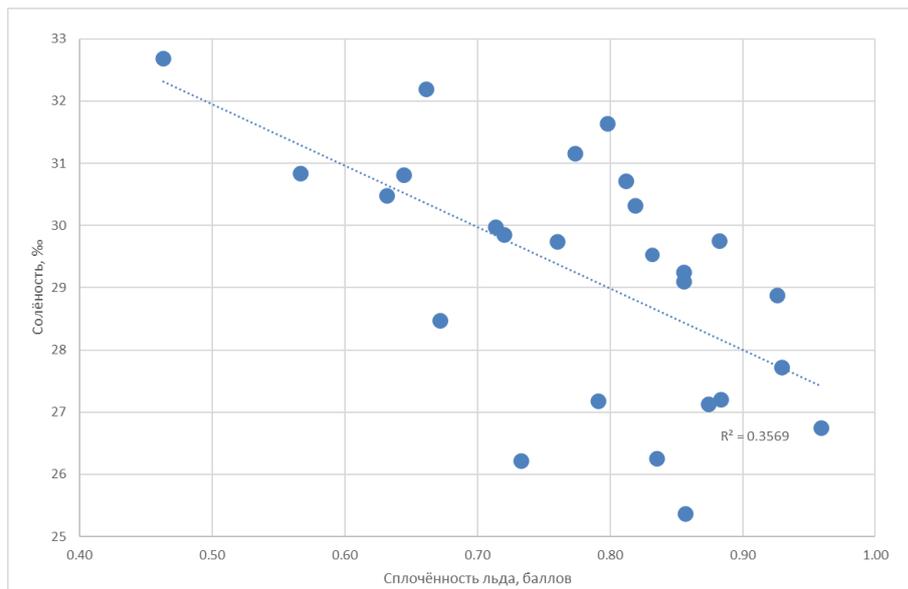


Рисунок 3.21 – Точечная диаграмма значений солёности КСМС первого разреза и сплочённости льда на том же разрезе.

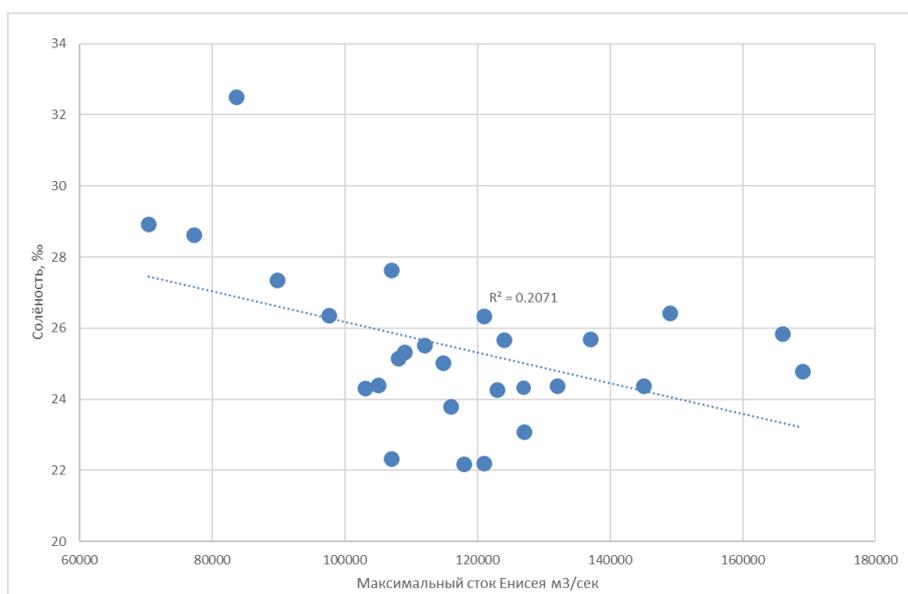


Рисунок 3.22 – Точечная диаграмма значений солёности КСМС второго разреза и максимальных значений стока реки Енисей.

Заключение

В ходе проделанной работы была рассмотрена климатическая изменчивость верхнего распреснённого слоя Карского моря и сделаны основные выводы.

1. По данным реанализа морской службы Copernicus были построены распределения солёности для семи разрезов по всей акватории Карского моря. Отмечено, что потоки распреснённой воды из эстуариев стремятся занять восточную часть акватории моря, что связано с воздействием на них силы Кориолиса, течений в Карском море, а также переменному направлению ветра над акваторией.

2. Для статистически выявленного класса с минимальной солёностью (КСМС) на каждом из разрезов и рассчитанному для него занимаемому объёму воды обнаружены месяцы с максимальными и минимальными значениями солёности (для первого разреза «солёный» месяц май, «пресный» - август; для второго разреза «солёный» - май, «пресный» - август; для третьего разреза «солёный» - апрель, «пресный» - июнь; для четвёртого разреза «солёный» - май, «пресный» - июль; для пятого разреза «солёный» - май, «пресный» - июль; для шестого разреза «солёный» - май, «пресный» - август; для седьмого разреза разреза «солёный» - май, «пресный» - июль), а также циклические колебания этих характеристик, имеющие период около 2-3 лет.

3. Для большинства разрезов солёность КСМС значимо коррелирует с объемом этого класса.

4. На основе взаимокорреляционного анализа между «пресным» и «солёным» состояниями КСМС выявлена синхронная связь для разрезов, расположенных в юго-западной части Карского моря.

5. Обнаружена обратная значимая корреляционная связь между значениями солёности КСМС разрезов в юго-западной части моря и сплочённостью льда в зимнее время на этих же разрезах. Такая же синхронная

корреляция проявилась между солёностью КСМС на этих разрезах и характеристиками стока рек Оби и Енисея.

Для более полного анализа полученной гидрологической ситуации Карского моря, планируется проделать ту же работу с другими разрезами Карского моря или использовать значения характеристик с другой базы данных.

Список используемых источников

1 Structure of the Freshened Surface Layer in the Kara Sea During Ice-Free Periods / Osadchiev A., Izhitskiy A., Zavalov P., et al. // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2020. - № JC016486. – С. 1 – 25;

2 Географический справочник «Россия – Родина моя». [Электронный ресурс] URL: <http://russia.1pku.ru/index.php/nature/morya-i-okeany/morya/55-karskoe-more/7-karskoe-more> (дата обращения 07.05.2022);

3 Деев М. Г., Карское море. Большая российская энциклопедия. [Электронный ресурс] URL: <https://bigenc.ru/geography/text/2049073> (дата обращения – 07.05.2022);

4 Океанографическая энциклопедия / W. Fairbridge; Пер. с англ. А. А. Алимова, Т. А. Алимова, М. В. Данилевской и др. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. – 631 с.;

5 A Reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean / V. V. Gordeev, J. M. Martin, J. S. Sidorov, M. V. Sidorova // American Journal of Science. – 1996. - №296. – С. 664-691;

6 Экологический атлас. Карское море / В. О. Мокиевский, А. Б. Цетлин, Л. А. Сергиенко. и др.; под редакцией В. А. Павлова, Е. С. Лебедева, В. Г. Лакеева. – Москва: Арктический научный центр, 2016. – 272 с.;

7 Brown, N. J. Arctic Ocean freshwater dynamics: Transport Response to Increasing River Runoff and Precipitation / N. J. Brown, J. Nilsson, P. Pemberton // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2018. - № JC014923. – С. 5205 – 5219.;

8 Carmack E., Polyakov I., Padman L. et al, Toward quantifying the increasing role of oceanic heat in sea ice loss in the new Arctic. Am. Meteorol. Soc., 2015. – Vol. 96: P. 2079-2105;

9 Pavlov V.K., Pfirman S.L., Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution, Deep-Sea Res. (II). – 1995. – Vol. 42. № 6: P. 1369-1390;

10 Зацепин А.Г., Морозов Е.Г., Пака В.Т., Демидов А.Н., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Поярков С.Г., Соловьев Д.М., Циркуляция вод в юго-западной части Карского моря в сентябре 2007 года, *Океанология // Физика моря*, том 50, №5, 2010: С. 683-697;

11 Analysis of the Beaufort Gyre Freshwater Content in 2003-2018 // Proshutinsky A., Krishfield R., Toole J. M., et al. // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2019. - № JC015281. – С. 9659-9689;

12 Changing Arctic Ocean freshwater pathways / Morison J., Kwok R., Peralta-Ferris C., et al. // *Nature*. – 2012. - № 481. – С. 66-70;

13 Arctic ocean freshwater changes over the past 100 years and their causes / Polyakov I. V., Alexeev V. A., Belchansky G. I., et al. // *Journal of climate*. – 2008. - № 21. – С. 364-384;

14 Arctic ocean freshwater content and its decadal memory of sea-level pressure / Johnson H. L., Cornish S. B., Kostov Y., et al. // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2017. - № GL076870. – С. 4991-5001;

15 Pivovarov, S. River run-off influence on the water mass formation in the Kara Sea / S. Pivovarov, R. Schlitzer, A. Novikhin // - С. 9-26;

16 Осадчиев, А. А. Речные плюмы / А. А. Осадчиев. – Москва: Научный мир, 2021;

17 Structure of the buoyant plume formed by Ob and Yenisei river discharge in the southern part of the Kara Sea during summer and autumn // Osadchiev A. A., Izhitskiy A. S., Zavialov P. O., et al. // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2016. - № JC012693. – С. 1-20;

18 Wave climate and storm activity at the Kara sea / Myslenkov S., Platonov V., Kislov A., и др. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2020. - № 198. – С. 1-23;

19 CMEMS. Copernicus Marine Service. [Электронный ресурс] URL: <https://marine.copernicus.eu> (дата обращения – 07.05.2022);

20 Вайновский П. А., Малинин В. Н., Методы обработки и анализа океанологической информации. Многомерный анализ. Учебное пособие СПб., изд. РГГМИ, 1992. – 96 с.;

21 [Scikit-learn: Machine Learning in Python](#), Pedregosa et al., JMLR 12, pp. 2825-2830, 2011;

22 Гордеева С. М., Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». – СПб, изд. РГГМУ, 2017 – 67 с.;

23 Shiklomanov, A.I., R.M. Holmes, J.W. McClelland, S.E. Tank, and R.G.M. Spencer. 2021. Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset, Version 20220425. [Электронный ресурс] URL: <https://www.arcticrivers.org/data> (дата обращения – 12.06.2022);

24 Лапин С. А., Особенности формирования пресноводного стока в эстуарных системах Оби и Енисея. Труды ВНИРО. – 2017. – Том 166. – С 139-150;

25 Bottom Sediments Reveal Inter-Annual Variability of Interaction between the Ob and Yenisei Plumes in the Kara Sea / Osadchiev A. A., Asadulin En. E., Miroshnikov A. Yu., et al. // *Nature Research: Scientific Reports*. – 2019. № 9:18642. – С. 1-11.