



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления
прибрежными зонами**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему Пространственно-временная изменчивость верхнего распреснённого
слоя в Карском море

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)

«14» ОБ 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Особенности распределения распреснённой водной массы в Карском море (обзор исследований).....	6
1.1. Физико-географическое описание Карского моря.....	6
1.2 Гидрологический режим поверхностного слоя Карского моря	7
1.2.1. Место Карского моря в системе водообмена Северного Ледовитого океана	8
1.3 Распреснённые водные массы Карского моря	11
Глава 2. Методы исследования и исходные данные	23
2.1. Описание исходных данных	23
2.2. Методика выполнения работы.....	25
2.2.1. Интерполяция сеток баз данных	25
2.2.2 Кластерный анализ	26
2.2.4. Статистические вычисления и вейвлет-анализ.....	28
Глава 3. Пространственно-временная изменчивость верхнего распреснённого слоя Карского моря	30
3.1 Обнаружение пространственных границ верхнего распреснённого слоя Карского моря.....	30
3.2 Выявление пространственно-временной изменчивости верхнего распреснённого слоя Карского моря посредством классификации водных масс	38
3.2.1. Выявление климатической изменчивости центроидов каждого из признаков классификации водных масс	38
3.2.2. Анализ пространственно-временной изменчивости распреснённого, речного и ледового классов	52

3.3 Оценка объёмов воды каждого из классов.....	58
3.4 Оценка связей между объёмами и стоком рек.....	63
Заключение	67
Список использованной литературы.....	69

Введение

Северный Ледовитый океан с момента своего открытия был одной из наименее изученных частей Мирового океана. Сегодня же исследования морских акваторий Арктического региона являются передовыми направлениями для современной науки. Арктика представляют интерес не только для учёных гидрометеорологов, но и для людей из самых широких сфер деятельности: нефтегазового дела, судоходства, развития туризма за полярным кругом, географо-экономической оценки территорий. Ключевую роль в деятельности человека в Арктике играют северные моря.

Одним из главных морей Арктики является Карское море. Представляя собой источник распреснённых водных масс, Карское море своими водами может воздействовать на стратификацию ближайших морей. Изучение гидрологического режима Карского моря и его влияние на Арктику в целом – одна из важных задач, которая может возникнуть перед современным мировым научным сообществом. 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 ближайших островах. В данной работе будет рассмотрена пространственно-временная изменчивость верхнего распреснённого слоя Карского моря.

Актуальность научных исследований пространственно-временной изменчивости верхнего опреснённого слоя Карского моря обусловлена двумя факторами. Во-первых, глобальное потепление приводит к изменениям структуры морского льда и характера стока арктических рек, что больше опресняет поверхностный слой исследуемого моря. Во-вторых, наличие современных модельных данных о характеристиках воды позволяет рассчитывать объёмы водных масс и гидрологический режим морей без натурных данных. Развитие моделей реанализа позволило обрабатывать огромные массивы данных, недоступных для натурных наблюдений, собранных

на океанологических станциях. Хотя данные моделей дают ценную информацию, их качество может варьироваться, что подчеркивает важность дополнительных исследований.

Изучение пространственно-временной изменчивости верхнего распреснённого слоя Карского моря имеет большое значение по следующим причинам:

- верхний распреснённый слой является важным местом обитания для морских организмов. Изменения его структуры и динамики могут повлиять на распределение питательных веществ, первичную продуктивность и видовой состав морской экосистемы;
- распреснённый слой играет важную роль в формировании климата Арктического региона. Он влияет на поглощение и отражение солнечной радиации, а также на процессы теплообмена между океаном и атмосферой;
- изменения распреснённого слоя могут влиять на условия судоходства и освоения природных ресурсов в Карском море. Например, распреснение может привести к образованию ледяных заторов и затруднить навигацию;
- климатические изменения приводят к увеличению речного стока в Карское море, что, в свою очередь, влияет на структуру и динамику верхнего распреснённого слоя. Изучение этих изменений необходимо для прогнозирования и адаптации к будущим климатическим условиям.

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

- 1) с помощью языка программирования Python статистической классификацией методом k-means выявить классы распреснённых талой и речной вод Карском море;
- 2) посчитать полученный объём распреснённой речной воды в Карском море;
- 3) выполнить анализ пространственно-климатической изменчивости верхнего распреснённого слоя Карского моря;

4) статистически определить наличие или отсутствие связи между центрами кластеров, объёмами распреснённых вод и другими гидрометеорологическими процессами.

Понимание того, как водная масса с определенными характеристиками меняет свое местоположение с течением времени, дает ценную информацию о динамике воды в Карском моря. В работе будет выявлено, что по модельным данным реанализа верхний распреснённый слой Карского моря подвержен пространственным и климатическим изменениям.

Глава 1. Особенности распределения распреснённой водной массы в Карском море (обзор исследований)

1.1. Физико-географическое описание Карского моря

Карское море – полузамкнутое море Российской Арктической зоны Северного Ледовитого океана, ограниченное архипелагом Новая Земля с запада, архипелагом Северная Земля с севера-востока и северным побережьем Евразии. Карское море имеет связь с Баренцевым через пролив Карские ворота, а также в районе глубоководного жёлоба Святой Анны; с морем Лаптевых связано через пролив Вилькицкого; с остальным Северным Ледовитым океаном связано в северной своей части в районе перехода шельфовой зоны в глубоководную.

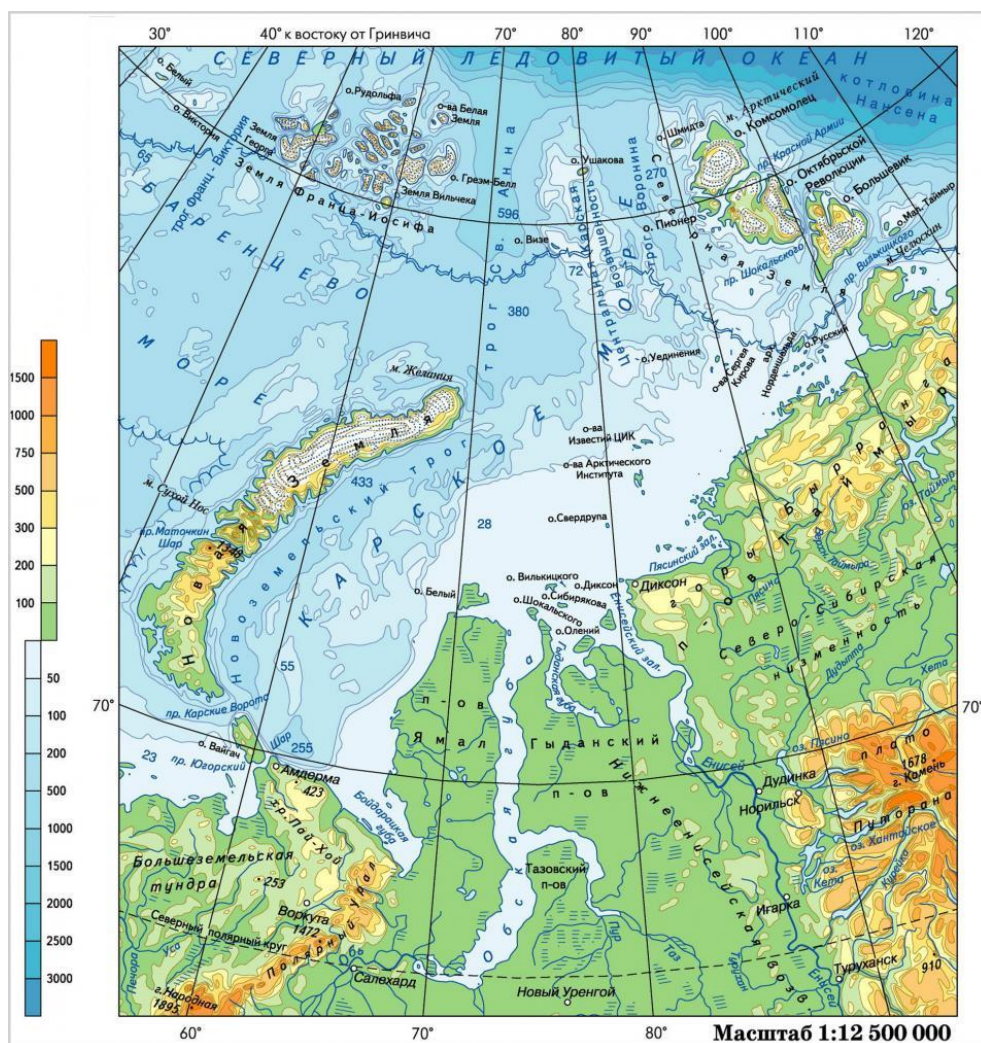


Рисунок 1.1 – Географическая карта Карского моря [1].

Шельфовая часть моря, глубиной не более 50 метров, располагается в центральной и юго-восточной частях Карского моря, составляя более 40% его площади [2]. Подводную центральную Карскую возвышенность разделяют два жёлоба: Святой Анны и Воронина, врезающиеся в шельф с севера. Вдоль всего восточного побережья архипелага Новая Земля пролегает Новоземельская впадина.

Площадь моря составляет 893 тыс. км², объём вод – 101 тыс. км³, наибольшая глубина около 600 м (жёлоб Святой Анны), средняя глубина – 113 м [3]. Наибольшая протяжённость с северо-востока на юго-запад – 1500 км между 81° и 68° с. ш., максимальная ширина – 800 км. Длина береговой линии вдоль материка 9047 км, а вдоль островов 5653 км. Крупнейшие заливы Карского моря – Байдарацкая, Обская, Гыданская губы; Енисейский, Пяснинский и Таймырский заливы – сильно врезаны в материковый берег. Крупнейшие реки, впадающие в море – Енисей, Обь, Пяси́на, Кара, Пур, Таз. В море расположено большое количество островов, их общая площадь составляет 10 000 км².

В море ежегодно поступает огромный объём речного стока (около 1500 км³) [2]. Основными генераторами пресной воды являются реки Обь (530 км³) и Енисей (630 км³) [4]. Объём пресных вод в Карском море меняется в зависимости от сезона года. Период половодья в июне - июле, характеризуется 50% годового стока [5]. Остальной длинный период года характеризуется малым объёмом стока с резкими и интенсивными осенними паводками.

Опреснённый поверхностный слой образует один из самых больших участков распреснённой воды в Северном Ледовитом океане и оказывает непосредственное влияние на гидрологический режим Карского моря и его плотностную стратификацию, образование ледового покрова [2, 4].

1.2 Гидрологический режим поверхностного слоя Карского моря

Температура поверхностного слоя Карского моря зимой, чаще всего, по своим значениям приближена к температуре замерзания воды [6]. Летом

значения температуры воды меняются от 0 °С в северо-восточной части региона до 5 °С на его южных границах у побережья. Значения солёности в зимний период понижаются с северо-запада моря до юго-востока моря от 34 ‰ у архипелага Новая Земля до 20 ‰ у острова Диксон [7]. В летний период солёность уменьшается с севера на юг от 33 ‰ на широте архипелага Земля Франца-Иосифа до 11 ‰ у острова Диксон.

1.2.1. Место Карского моря в системе водообмена Северного Ледовитого океана

Циркуляция вод Северного Ледовитого океана изображена на рисунке 1.2.

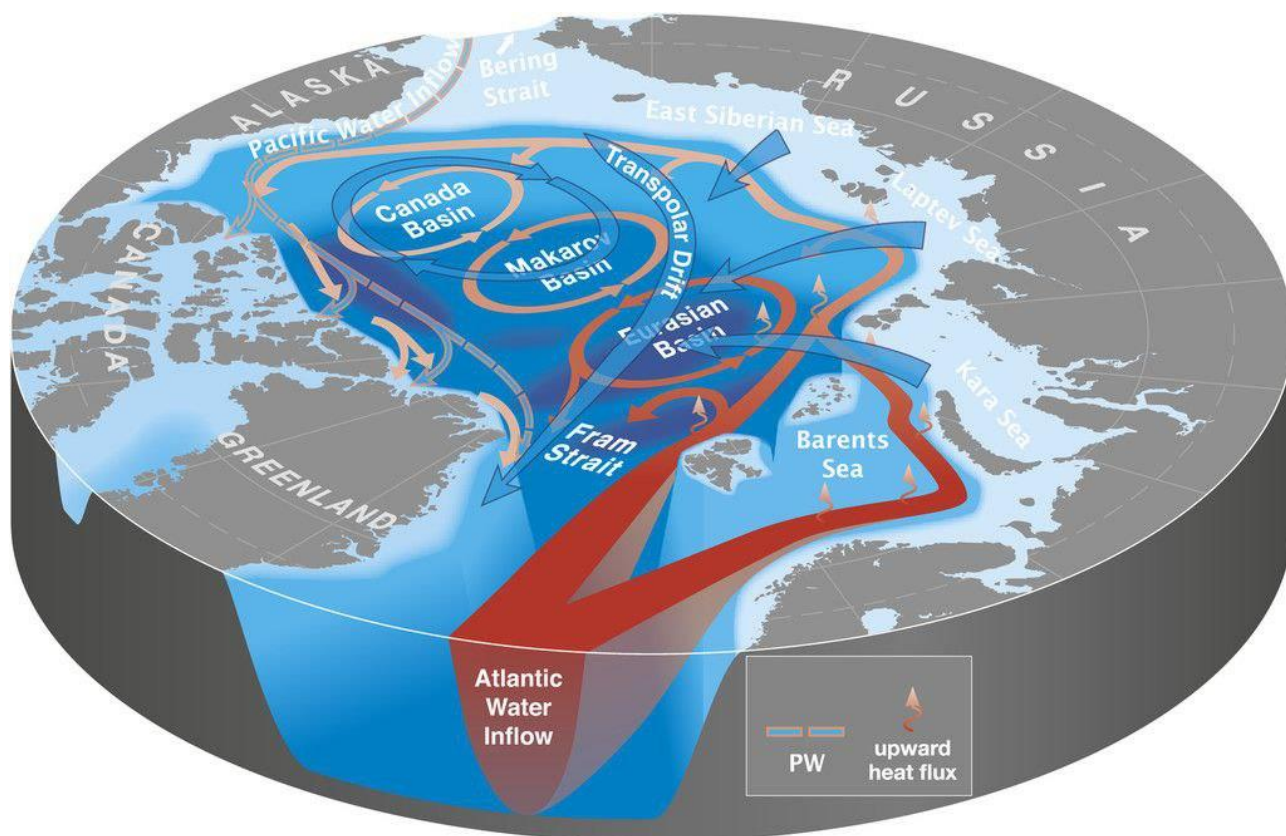


Рисунок 1.2 – Карта циркуляции поверхностных вод (синий), промежуточных тихоокеанских вод (розовый/синий) и атлантических вод (красный) бассейна Северного Ледовитого океана [8].

В большей части Северного Ледовитого океана, водная масса, имеющая начало из Атлантических вод, покрывается распреснённым и лёгким

поверхностным слоем, источником которого является сток с суши, таяние льдов, выпадение осадков и сход материкового льда в море [9]. Объём стока с Сибирского побережья Евразии и Северной Америки составляет около 4200 км³/год, а объём водной массы, образовавшейся за счёт осадков, составляет около 2200 км³/год (данные за 2000 - 2010 гг.).

Схема течений Карского моря представлена на рисунке 1.3. По данной схеме Восточно-Новоземельское течение (продолжение Западно-Новоземельского течения в Баренцевом море) следует на юго-запад вдоль восточного берега архипелага Новая Земля [3]. Баренцевоморская вода, входящая в Карское море через пролив Карские ворота, пересекает Байдарацкую губу и у побережья полуострова Ямал поворачивает в северном направлении, образуя Ямальское течение. Далее к северу данное течение сливается с Обь-Енисейским поверхностным и распреснённым и севернее образует западное ответвление, соединившись с Восточно-Новоземельским. Этот поток у пролива Карские ворота разветвляется: одна часть в виде течения Литке огибает с Юга архипелаг Новая Земля и уходит в Баренцево море, а другая – замыкает циклонический вихрь в юго-западной части Карского моря [10]. Вдоль берегов Таймыра до пролива Вилькицкого течёт Западно-Таймырское течение, утекая в море Лаптевых, образуя основной источник опреснённой легкой воды, вытекающей из Карского моря [11].

Объёмы поступления и расхода пресной воды не находятся в равновесном состоянии, так как поступающая пресная вода сохраняется долгое время (до 10 лет) в Северном Ледовитом океане, а не сразу покидает его пределы [9]. Этот процесс связан с колебаниями водной циркуляции, образующиеся в результате циклических колебаний ветрового режима в районе моря Бофорта и шельфовой зоны Азиатского побережья [12, 13, 14].

Изменение состояния пресной воды в Северном Ледовитом океане может быть связано с воздействием неустойчивости атмосферного давления на источники, поглотители и запасы пресной воды [9]. Выявлено, что запасы распреснённой воды в Северном Ледовитом океане увеличиваются с 2003 года,

и прогнозируется, что этот процесс может продолжаться в связи с усилением потепления глобального климата на Земле [15]. Объём речного стока в Северный Ледовитый океан прогнозируется на уровне около 5500 км³/год, а объём осадков на уровне около 2500 км³/год к 2100 году.

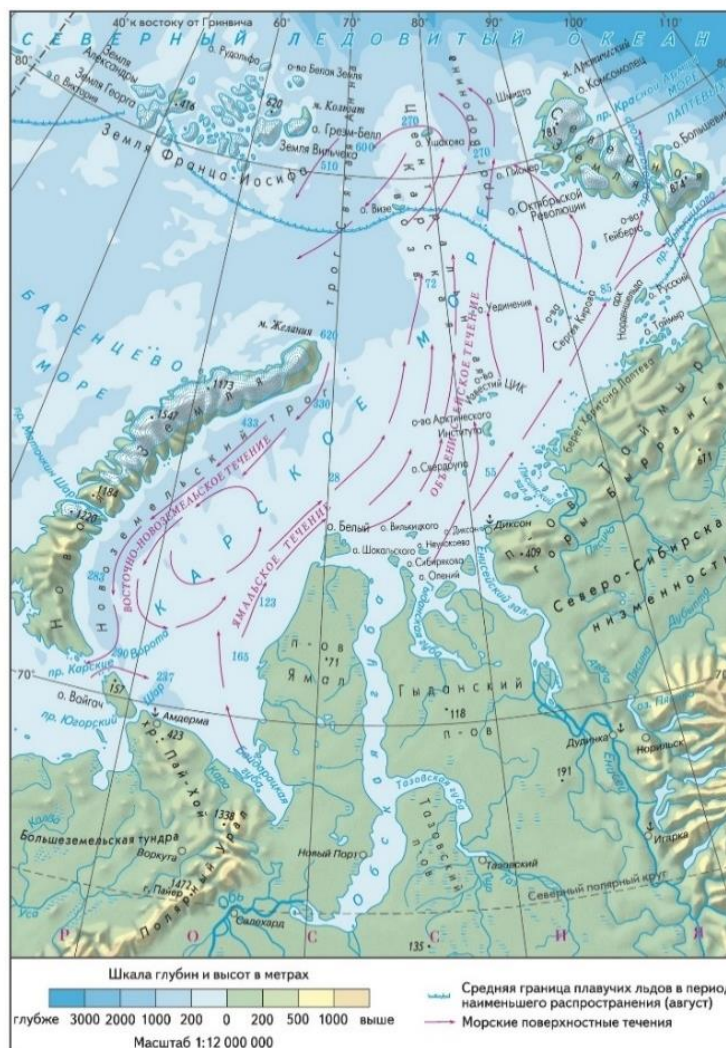


Рисунок 1.3 – Схема системы течений Карского моря [6].

Водные массы в Карском море можно разделить в зависимости от их положения в структурных зонах, местах и времени их формирования. Ввиду меняющихся гидрометеорологических, ледовых и биологических условий, в море формируется многослойная и мозаичная структура водной толщи [16]. Согласно принятым классификациям водных масс, в Карском море существует шесть основных таковых: пресные речные воды, поверхностные воды

Арктического бассейна и Карского моря, Баренцевоморские воды, глубоководные тёплые атлантические воды и зимние поверхностные воды [17, 18].

Влияние речного стока на формирование водной массы заключается в притоке тепла, уменьшении солёности воды, вносе в море растворённых и взвешенных органических и неорганических соединений, а также образование пикноклина [19].

1.3 Распреснённые водные массы Карского моря

Речной плюм – опреснённая водная масса, формирующаяся в море в процессе смешивания, как правило, пресных, лёгких, тёплых, богатых биогенными веществами и взвесью речных вод с морскими солёными и холодными [21]. Плюм представляет собой большой по площади, но тонкий поверхностный слой моря. Горизонтальная протяжённость плюма намного превышает его вертикальное развитие и зависит от различия в плотности между речной и морской водными массами. Полноводные реки формируют плюмы площадью свыше сотен квадратных километров.

Речные плюмы играют большую роль в происходящих в прибрежной зоне моря процессах. Они влияют на физические, биологические, геологические и химические взаимодействия, формируя плотностную стратификацию моря, прибрежные течения и опреснённые водные массы [5]. Сток рек выносит в море взвешенный материал, биогенные элементы, а также является источником тепла и новой воды для акватории [21]. Плюм представляет собой переходную зону между морской и речной водными экосистемами.

В конце лета - начале осени плюм занимает значительную часть акватории Карского моря, площадь которого может превышать 40 тыс. км² [7]. 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.

Глубина залегания границы опреснённого слоя варьируется в пределах от 5 - 7 метров до 10 - 15 метров, а иногда даже достигая 20 метров [22]. Это зависит от следующих факторов: объёма речного стока, силы и направления ветра, влияющего на перемешивание опреснённой водной массы [23].

Динамика плюма в Карском море определяется высокой межгодовой изменчивостью: распространение плюма обусловлено трением ветра и геострофической динамикой течений [7]. Выделено три различных типа распространения плюма: «западный», «восточный» и «центральный» (рисунок 1.4) [10, 22]. Для «западного» типа характерно распространение плюма в сторону архипелага Новая Земля, «восточный» тип плюма распространяется вдоль побережья Сибири на восток до пролива Вилькицкого, «центральный» тип плюма распространяется на север моря [24].

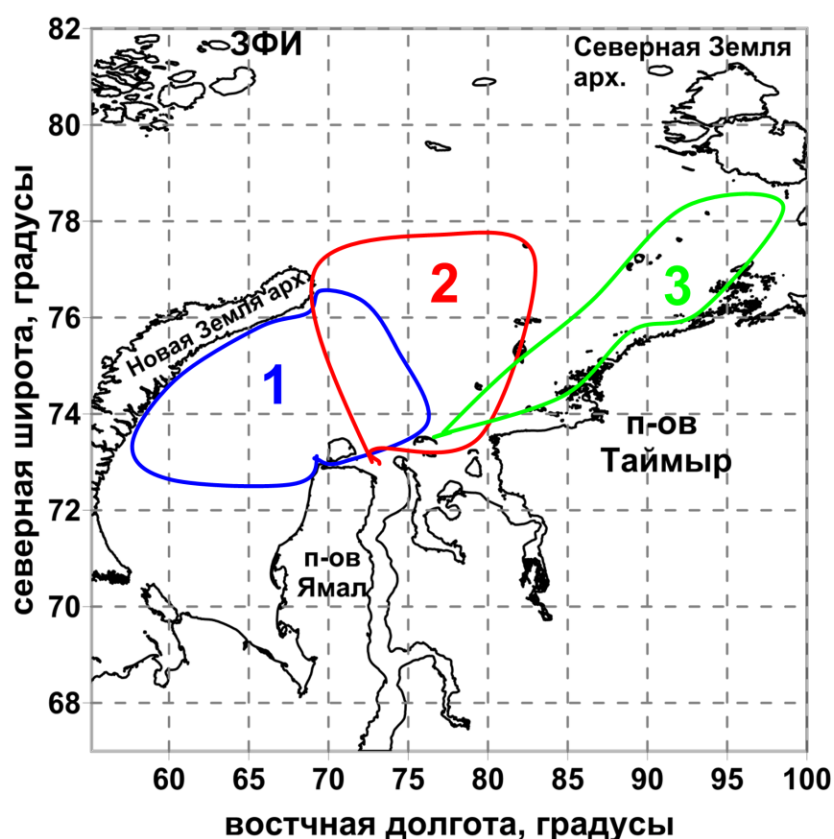


Рисунок 1.4 – Типы распределения опреснённой водной массы в Карском море:
1 – западный тип, 2 – центральный тип, 3 – восточный тип [23].

Одной из главных особенностей плюма, образуемого реками Обь и Енисей, является значительная пространственная неоднородность физико-химических параметров его отдалённой части [5]. Это вызвано тем, что, во-первых, несмотря на то, что Обская губа и Енисейский залив находятся близко друг к другу, между ними простирается 250 км водной поверхности, что значительно превышает локальный радиус деформации Россби, составляющий 5 км [20]. В результате терригенные донные отложения преобладают в областях плюмов, прилегающих к соответствующим заливам, образуя сложные смешивания внутри. 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.

Для определения границ распространения речного стока в море необходимо учитывать не только гидрофизические, но и гидрохимические свойства смешивающихся вод, а именно содержание растворённого кремния в морской воде [23]. Несмотря на его активное использование микроорганизмами, содержание кремния в материковом стоке значительно выше, чем в открытой части Карского моря. Граница распространения материкового стока определяется изолинией 10 μM кремния. Изменчивость этой изолинии в зависимости от сезона года изображена на рисунке 1.5.

На рисунке показано, что максимальные концентрации кремния наблюдаются весной в устье Енисейского залива [23]. В это же время происходит половодье на крупнейших реках Сибири. Вследствие этого распространение речных вод на север достигает максимальной широты (около 80° с.ш.) именно весной. Затем, летом эта граница максимально расширяется вдоль долготы, достигая северо-восточного побережья архипелага Новая Земля на западе и побережья полуострова Таймыр почти до 100° в.д. на востоке. Осенью изолиния 10 μM смещается, ограничивая центральную часть моря, и лишь на севере достигает 78° с.ш., а средняя концентрация кремния в поверхностном слое снижается из-за нескольких процессов: потребления фитопланктоном и смешивания с морской водой на фоне уменьшения речного стока. Зимой граница

влияния речных вод максимально приближена к устьям Обской губы и Енисейского залива из-за небольшого количества речного стока.

Пространственно-временная изменчивость верхнего слоя Карского моря не раз становилась объектом исследования российских и зарубежных учёных, особенно в последние годы. Исследования динамики пресного слоя Карского моря можно разделить на 4 типа: проведённые по натурным (местным) данным, собранным непосредственно на океанологических станциях [2, 10, 20, 26, 27, 28]; проведённые с помощью спутникового мониторинга [32, 33, 34, 35]; проведённые с помощью математического моделирования и проведённые при совместном использовании этих методов [29, 30, 31].

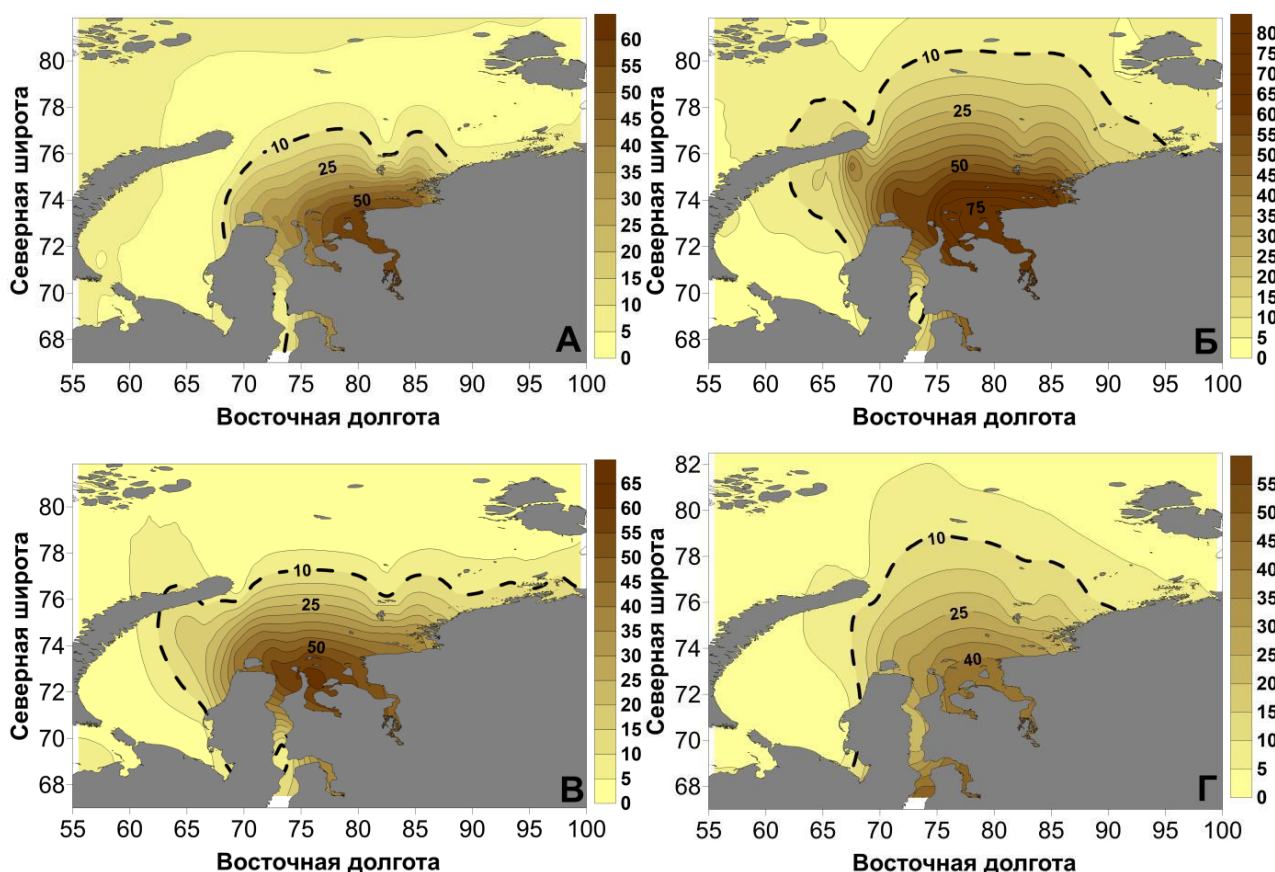


Рисунок 1.5 – Положение изолинии 10 μM растворённого кремния в Карском море: а – зимой, б – весной, в – летом и г – осенью [23].

Предыдущие исследования о пространственно-временной изменчивости верхнего слоя Карского моря были сосредоточены на крупномасштабных

физических процессах, а также пространственных характеристиках плюмов [10, 22]; в других изучался химический состав и на основе него выделялась динамика плюма [23, 25, 27, 28]; отдельно использовался седиментационный анализ донных отложений в прилегающей к эстуариям части Карского моря: изучались физические аспекты эволюции плюма, возникающего в результате взаимодействия между стоками Енисея и Оби и окружающим морем при различных условиях внешнего воздействия [5].

Прежде чем перейти к описанию пространственно-временной изменчивости объекта исследования, необходимо описать причины его возникновения. В данном случае основным источником опреснённого слоя в море являются Обская губа и Енисейский залив. Немаловажно описать, как проходит процесс образования в них такого огромного количества пресной воды.

В устье Енисея волна половодья, двигаясь без каких-либо преград и задержек, идёт вниз по течению, разрушая ледовые покровы, внедряясь в вершину Енисейского залива около середины июня [25]. Время освобождения заливов ото льда и попадание в них вод весеннего половодья наступает практически одновременно, что видно по гидрографам на станциях, расположенных в устьях обеих рек (рисунок 1.6).

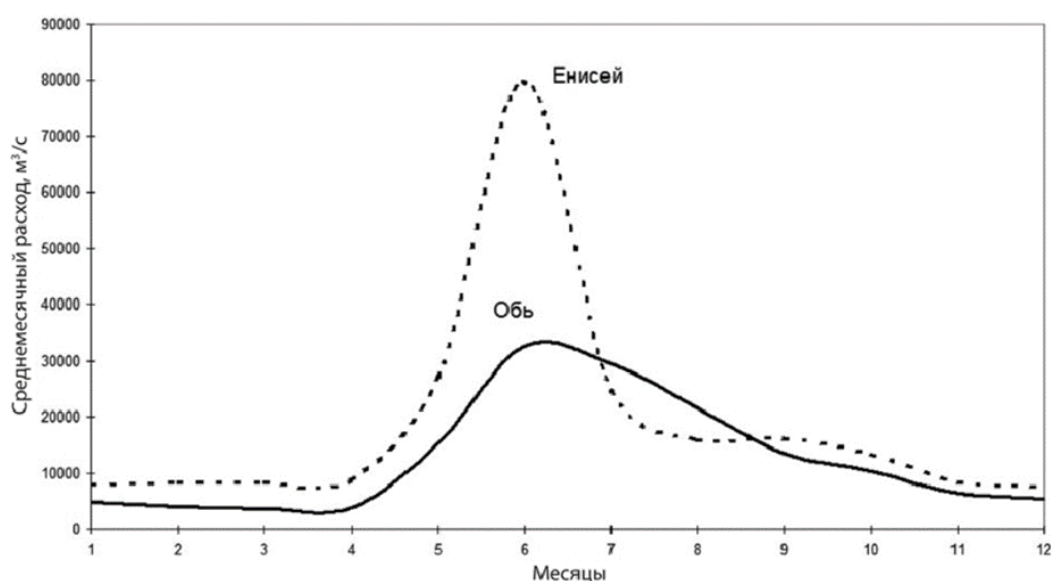


Рисунок 1.6 – Внутригодовое распределение стока на внешней границе дельты рек Оби и Енисея [25].

Волна половодья Енисея быстро достигает Енисейского залива – области смешения солёных и пресных вод, а воды Оби в то же время только попадают в южную часть протяжённого водоёма – Обской губы и начинают путь на север в сторону Карского моря, что обуславливает более позднее попадание туда пресной воды [25].

Река Обь имеет огромную площадь водосбора — около 3 млн. км², большая часть которого представляется болотистой низиной и находится вне зоны многолетней мерзлоты [25]. Всё это — ключевая причина поступления в Обскую губу с водами Оби большого количества органического вещества, гуминовых кислот, соединений железа. Воды других рек, поступающих в Обскую губу, но расположенных в районе вечной мерзлоты немного отличаются по химическому составу от вод Оби. Выяснено, что они существенно менее минерализованные (0.1–0.2 мг/л) и кисловатые (рН менее 7).

К моменту вскрытия Обской губы ото льда, наблюдаются максимальные в году концентрации кремния: — 140–180 мкМ, минерального азота — до 30 – 35 мкМ, фосфора фосфатов — около 3 мкМ [25].

В период половодья, смешивание вод в Обской губе происходит по неконсервативному типу: активный процесс регенерации биогенных элементов, из-за интенсивного разрушения органического вещества, приводит к повышению содержания кремния до 180 - 213 мкМ (против 15 - 60 мкМ в областях акватории вне влияния фронтальной зоны), а азота нитратов — до 10 - 12 мкМ (против его фактического отсутствия в пресноводной части губы в этот период) [25].

В период половодья (весенне-летний период), как правило, в июле - августе воды, поступающие непосредственно в море, содержат высокие концентрации биогенных элементов. Осенью данный процесс прекращается, и в Карское море поступают уже обеднённые биогенами воды [25].

В Енисейском же заливе такие процессы либо отсутствуют, либо слабо протекают, так как в большей степени это происходит из-за более интенсивного водообмена на данной акватории, вследствие его малого объёма по сравнению с

Обской губой и специфики глубин, в результате чего в залив поступают малотрансформированные речные воды Енисея [25]. Для сравнения, содержание кремния в Енисейском заливе – от 70 μM в весенне-летний период до 100 - 110 μM осенью. Также смешивание вод реки Енисей с морскими происходит преимущественно по консервативному типу, при котором доминирует простое перемешивание вод, не осложнённое процессами, как в Обской губе.

Считается, что обычно плюмы Оби и Енисея распространяются на север от Обь-Енисейского эстуария, занимая большие площади акватории и сталкиваясь в открытом море между полуостровами Ямал и Таймыр, что является типичной картиной для данного типа процессов в Карском море [24].

Большой вклад в натурные исследования распреснённого слоя Карского моря внёс А.А. Осадчиев, написав об пространственно-временной изменчивости плумов порядок статей. Во время рейсов в исследовании А.А. Осадчиева и соавторов выявили закономерность: во время паводка действие ветра значительно рассеивает поверхностный опреснённый слой на восток, в результате чего Обский плюм втекает в Енисейский залив [10]. Следовательно, Обский плюм занимает большую площадь по сравнению с Енисейским, который стремится ближе к полуострову Таймыр и проливу Вилькицкого. Примечательно, что образцы керна донных отложений, собранные в Енисейском заливе, содержали несколько слоев смешанной воды Обско-Енисейского происхождения, что указывает на то, что Обский плюм периодически входил в Енисейский залив в течение непродолжительных периодов времени [20].

Выводы, приведенные в другой статье А.А. Осадчиева и соавторов, указывают на то, что доля пресной воды в Енисейском заливе зависит от общего воздействия приливов на перемешивание воды в Енисейском заливе [26]. Это приливное перемешивание также определяет площадь плумов в прибрежных районах моря. Следовательно, роль эстуарного перемешивания в формировании пространственной протяжённости речного плюма может быть столь же значительной, как и влияние скорости речного течения и ветра на водную

поверхность. Таким образом, движущие силы с одинаковыми скоростями течения могут создавать речные плюмы различной протяжённости и площади.

Проблема проведения полномасштабных измерений в осенне-зимний период, когда Карское море покрыто льдом, была рассмотрена в следующей статье А.А. Осадчиева и соавторов [27]. В течение этого сезона пространственная изменчивость Обь-Енисейского плюма становится неопределенной. Исследование показало, что конвекция внутри плюма поздней осенью, непосредственно перед образованием льда, значительно уменьшает трение между опреснённым слоем и подстилающим морем. Кроме того, образование ледяного покрова изолирует плюм от воздействия ветра. Эти два процесса способствуют распространению Обь-Енисейского плюма подо льдом, создавая сильное прибрежное течение, обусловленное разницей в плавучести между слоями. Следовательно, с ноября по февраль плюм перемещается на восток путём адвекции в пролив Вилькицкого. К концу зимы плюм полностью покидает Карское море (рисунок 1.7).

В статье А.Г. Зацепина и соавторов в юго-западной части Карского моря был определен район опреснения площадью около 40 000 км² с солёностью воды ниже 25 ‰ [28]. На окраине этого региона, недалеко от побережья архипелага Новая Земля, был зафиксирована солёность менее 16 ‰. Толщина опреснённого слоя составляла около 10 метров. Химический анализ растворённого кремния, щёлочности и солёности показал, что река Енисей является основным источником опреснения этих морских вод. Наиболее опреснённый район у побережья Новой Земли представлял собой квазиизолированную линзу. Образование поверхностного опреснённого слоя было связано с июньским паводком, который привел к значительному "сбросу" речных вод в море, за которым последовал перенос опреснённых вод на запад в июле и августе из-за преобладающего северного ветра.

Исследование было продолжено Д.Н. Ёлкиным и соавторами [29]. Был проведён лабораторный эксперимент по изучению горизонтального перемешивания двух взаимодействующих струй пресной воды на поверхности

слоя солёной воды в резервуаре. Этот эксперимент выявил физический процесс, указывающий на то, что 3 - 4 месяцев недостаточно для полного горизонтального перемешивания плумов из рек Обь и Енисей.

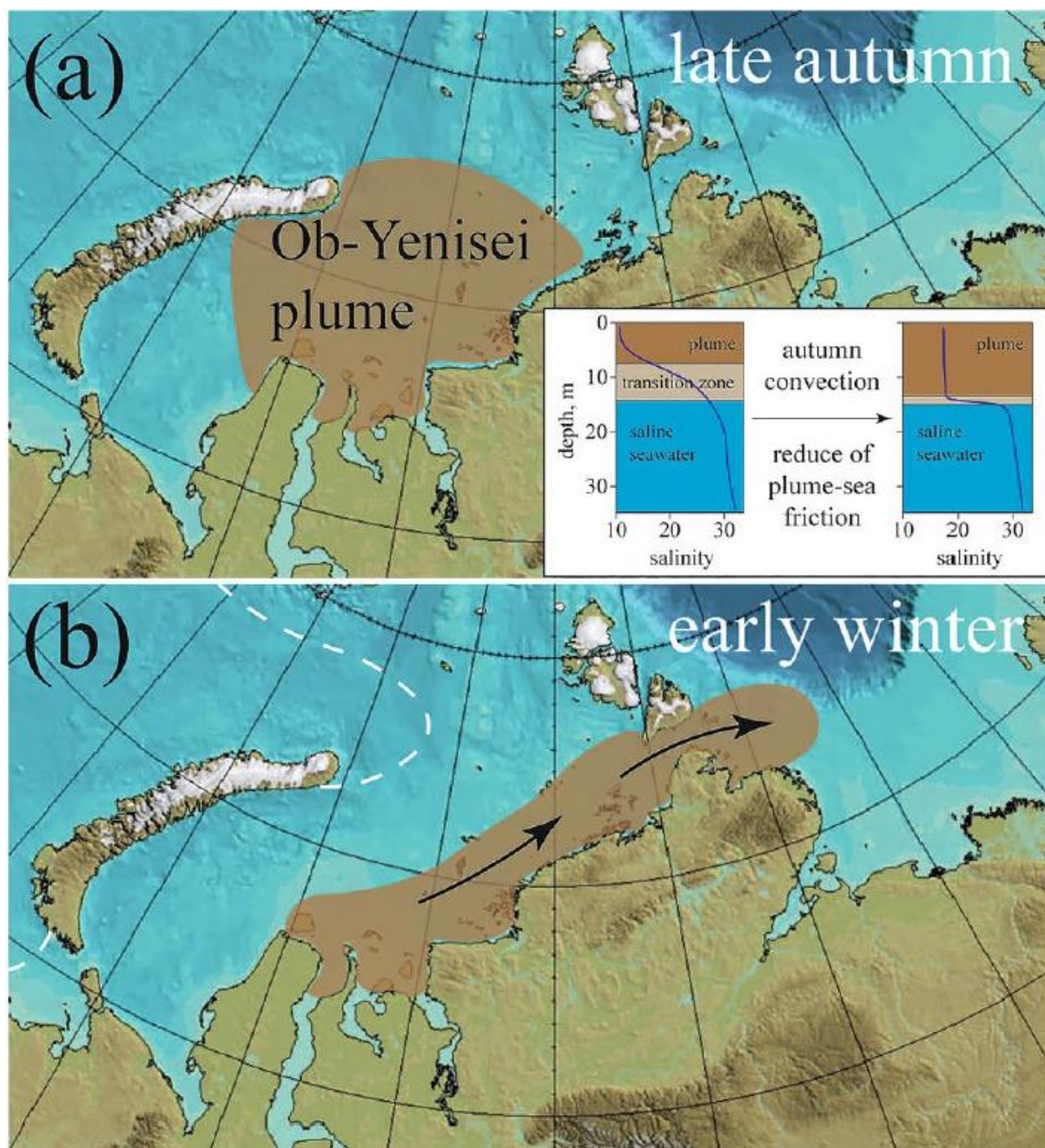


Рисунок 1.7 – Схема формирования течения пресных вод в ледовый период: (а) конвекция внутри Обь-Енисейского плума осенью до образования льда, (б) адвекция плума из Карского моря в начале зимы [27]. Вставка демонстрирует изменения солёности с глубиной в центральной части моря в результате конвекции.

В нескольких статьях исследовалось распределение плюма в Карском море с использованием математического моделирования, основанного на полевых наблюдениях. В статье В.М. Журбаса и П.О. Завьялова рассматривается механизм образования линз рек Оби и Енисея из-за ветрового дрейфа [30]. Численные расчёты траекторий движения лагранжевых буев, которые были запущены в северных районах рек и переносились дрейфующими течениями, были выполнены с использованием данных о воздействии ветра. Расчёты скорости поверхностного дрейфа и относительного направления ветра учитывали стратификацию плотностной структуры, вызванную наличием слоя пресной воды на поверхности моря. Было продемонстрировано, что только модели ветрового дрейфа, учитывающие стратификацию, могут объяснить перенос паводковых вод из рек Енисей и Обь к месту обнаружения линзы.

Основываясь на предыдущем исследовании, в статье А.Г. Зацепина и соавторов описан потенциальный механизм трансформации линзы опреснённой воды в Карском море под воздействием вертикального турбулентного перемешивания, вызванного ветром [31]. Используя простую одномерную модель, исследование показывает, что наиболее значительные изменения происходят на краю линзы или в её фронтальной зоне, где опреснённый слой является самым тонким. Из-за сильной нелинейной зависимости турбулентного потока энергии от скорости ветра во время штормов происходит существенная трансформация фронтальной зоны линзы. Серия последовательных штормов может привести к горизонтальной фрагментации линзы на несколько зон, при этом солёность резко возрастает по направлению к краю линзы.

В следующих исследованиях использовались спутниковые технологии. Например, Д.И. Фрей и А.А. Осадчиев проанализировали потенциал спутниковой альтиметрии для обнаружения Обь-Енисейского плюма в Карском море [32]. Используя данные, собранные с 2007 по 2019 год, они оценили точность и эффективность спутниковой альтиметрии в воспроизведении как внешней границы, так и внутренней структуры плюма. Исследование показало, что величина положительной аномалии уровня в пределах Обь-Енисейского

плюма сильно зависит от его вертикальной структуры и в значительной степени зависит от синоптических и сезонных колебаний, обусловленных воздействием ветра и перемешиванием с подстилающим морем. Выявлено, что несмотря на сильную статистическую корреляцию между альтиметрией и солёностью поверхности, прямое применение этого метода для обнаружения речного плюма является некорректным и приводит к ошибочным результатам.

А.А. Кубряков и соавторы в своей статье посвятили внимание межгодовой изменчивости динамики речного плюма в Карском море на основе наблюдений с нескольких спутников [33]. Данные о солёности и хлорофилле-А за период с 2011 по 2014 год в сочетании с гидрологическими наблюдениями были использованы для идентификации плюмовых вод и подтверждения достоверности спутниковых измерений. Полученные данные указывают на то, что самоорганизующаяся геострофическая циркуляция плюма, обусловленная разницей в плавучести между легкой и плотной морской водой, наряду со сменой преобладающего направления ветра, являются ключевыми факторами, влияющими на динамику плюма и его межгодовую изменчивость.

В исследовании, проведенном А.А. Осадчиевым и соавторами, используются спутниковые данные для наблюдения за толщиной морского льда в Северном Ледовитом океане в фазе его таяния. Анализируя данные за период с 2012 по 2020 год, авторы исследования оценили годовой объём талой воды, образующейся в результате таяния льдов, уделяя особое внимание Обско-Енисейским водам [34]. Доля этой талой воды в общем объёме Обь-Енисейского плюма составляет примерно от 6 до 11 %.

В работе, проведенной А.А. Коником и соавторами на основе анализа валидированных спутниковых данных по температуре, солёности и уровню моря описана синоптическая изменчивость характеристик в области стоковой фронтальной зоны Карского моря в августе - сентябре 2019 г. [35]. Результаты валидации показали высокую точность воспроизведения спутниковыми системами поверхностных полей температуры и солёности Карского моря. Положение и характеристики поверхностного опреснённого слоя, на внешней

границе которого обнаруживается стоковая фронтальная зона, выделялись с помощью кластерного анализа.

Таким образом, формирование и эволюция пресноводного плюма, образующегося в результате взаимодействия рек Обь и Енисей, является ключевым аспектом гидрологии региона. На пространственно-временную изменчивость плюма влияют различные факторы, включая перемешивание в устье реки, характер ветра, приливные воздействия и условия турбулентного перемешивания. Математическое моделирование и спутниковые технологии предоставили ценные инструменты для изучения распределения и характеристик плюма. Исследования, представленные в этой главе, способствуют лучшему пониманию сложной гидродинамики пресной воды в Карском море, расширяя наши знания о морской среде Арктики и её реакции на изменение климата.

Данное исследование основывается на модельных данных реанализа, чего ещё не было сделано по проблеме исследования пространственно-временной изменчивости верхнего распреснённого слоя Карского моря.

Глава 2. Методы исследования и исходные данные

2.1. Описание исходных данных

Для проведения исследования пространственно-временной изменчивости верхнего распреснённого слоя Карского моря были выбраны данные о солёности и температуре воды, а также о концентрации силикатов в воде в четырёхмерном пространстве, включающее в себя распределение по широте, долготе, глубине и времени. Границы пространства ограничены 72° с.ш. с юга, 79° с.ш. с севера и 60° в.д. с запада, 105° в.д. с востока. Регулярная сетка значений с шагом 0.25 градуса по долготе и широте имеет измерения на следующих глубинах: 0.49, 1.54, 2.65, 3.82, 5.08, 6.44, 7.93, 9.57, 11.40, 13.47, 15.81, 18.50 и 21.60 метров, изменяя нижний горизонт значений в зависимости от глубины (рисунок 2.1). Временной диапазон исследования включает среднемесячные значения с января 1993 года до июня 2021 года.

Таким образом, исходная матрица состоит из трёх переменных (признаков) в пространственно-временном домене из 180 долгот $\times$ 28 широт $\times$ 13 глубин $\times$ 342 моментов времени, то есть размером 22 407 840 значений.

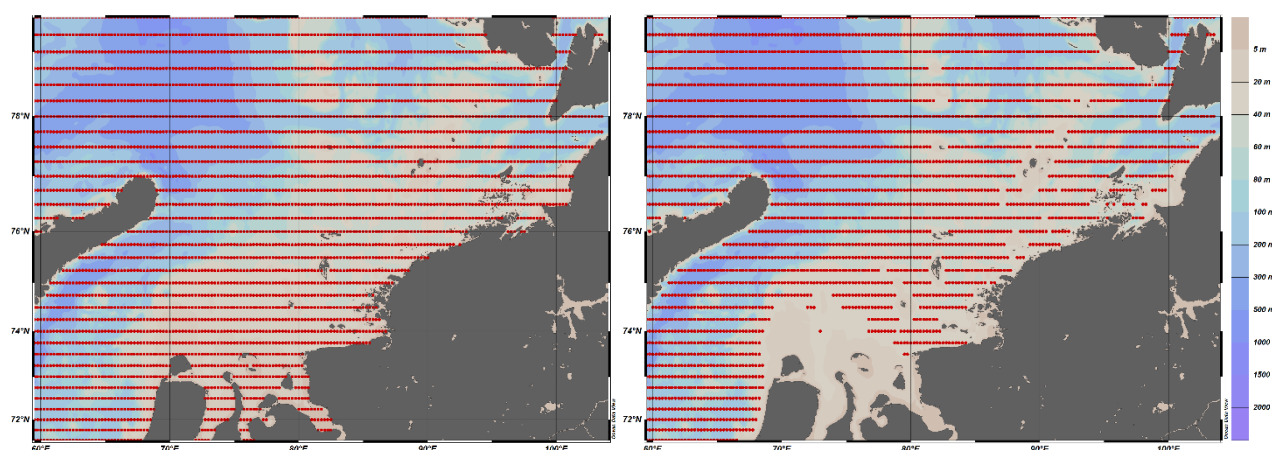


Рисунок 2.1 – Точки региона исследования в Карском море на поверхности (слева) и 21.60 метра (справа). Красным цветом обозначены точки сетки измерений. Цветовой шкалой обозначены глубины.

Данное пространство было выбрано 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 [20, 23, 24].

Одной из основных баз данных в исследовании является глобальный физический реанализ океана GLORYS12V1, известный как GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030 (DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>), используемый нами для получения данных солёности, температуры воды и концентрации льда на поверхности Карского моря. Этот продукт, являющийся частью CMEMS, обеспечивает глобальный реанализ мирового океана с возможностями разрешения до обнаружения субмезомасштабных физических процессов. Файлы представлены в стандартной сетке с разрешением $1/12^\circ$ и 50 уровнями по вертикали. Реанализ использует данные альтиметрии с 1993 года, что повышает его точность и надёжность.

Эта база данных, основанная в первую очередь на глобальной системе прогнозирования CMEMS в режиме реального времени, построена на платформе NEMO и первоначально использовались на промежуточных данных ERA ECMWF, в последние годы перешедшей на реанализ ERA5. Процесс ассимиляции включает в себя фильтр Калмана редуцированного порядка, включающий различные наблюдения, такие как альтиметрия, температура поверхности моря со спутника, концентрация морского льда, а также профили вертикальной температуры и солёности. Схема 3D-VAR дополнительно уточняет набор данных, корректируя постепенные крупномасштабные изменения температуры и солёности. Временной охват базы данных включает период с 1 января 1993 года 1 июня 2021 года.

Второй базой данных является глобальный биогеохимический реанализ океана GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_001_029 (DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00019>) о данных концентрации силикатов в воде. В ней представлены трёхмерные биогеохимические поля за период 1993 - 2021 гг. с шагом сетки $1/4$ градуса и на 75 вертикальных уровнях. В базе данных используется

биогеохимическая модель PISCES (доступна на платформе моделирования NEMO). В этом продукте отсутствует ассимиляция данных. Временной охват базы соответствует первой базе данных.

Дополнительными наборами данных стала информация о расходах стока рек Оби и Енисея, взятая с сайта обсерватории главнейших рек Арктики с помощью интерактивных годографов (электронный ресурс: <https://arcticgreatrivers.org/discharge/>). Гидрографическая станция Оби – пункт Салехард, Енисея – пункт Игарка.

2.2. Методика выполнения работы

2.2.1. Интерполяция сеток баз данных

Используемые базы данных имеют одинаковое пространственное покрытие региона, но имеют сетку с различным шагом: для базы данных, содержащей в себе значения температуры и солёности воды, она составляет 0.083° , а для базы данных, содержащей в себе значения концентрации силикатов в воде, она составляет 0.25° , поэтому было решено привести сетку первой базы данных к сетке второй. Осуществлялось это с помощью триангуляции с линейной интерполяцией в языке программирования Python модулем «scipy».

Метод триангуляции представляет собой способ определения плановых координат точек путём построения на местности цепей и сетей из треугольников, связанных общей стороной. Для выполнения интерполяции в произвольно заданной точке (x, y) необходимо найти уравнение плоскости того треугольника, который включает данную точку. В общем виде уравнение плоскости содержит четыре неизвестных коэффициента: $A_x + B_y + C_z + D = 0$. Имея три точки $p_1(x_1, y_1, z_1)$, $p_2(x_2, y_2, z_2)$, $p_3(x_3, y_3, z_3)$, искомые коэффициенты можно получить путём решения уравнения, левая часть которого задана в форме определителя:

$$\begin{pmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{pmatrix} = 0 \quad (2.1)$$

Коэффициенты A , B , C и D вычисляются заранее для каждого треугольника и хранятся вместе с триангуляцией. Тогда $z_{(x,y)} = -(A_x + B_y + D)/C$.

2.2.2 Кластерный анализ

Следующая методология, использованная в этом исследовании, основана на кластерном анализе, многомерном статистическом методе, используемом для обработки данных. В частности, кластерный анализ облегчает автоматическую классификацию, разбивая собранные значения характеристик воды на подмножества или классы на основе их сходства значений солёности, температуры и концентрации силикатов в воде [36].

Для выполнения кластерного анализа был использован метод k-means. Этот алгоритм, известный своей эффективностью, особенно при работе с большими массивами данных, основан на итеративных вычислениях, что позволяет быстро находить решения для кластеризации [36].

Метод k-means делит данные на N кластеров путём минимизации суммы квадратичных расстояний каждой записи до среднего значения назначенного ей кластера [37]. Это среднее значение (центр кластера, центроид), выражается внутрикластерной суммой квадратов. Метод не обеспечивает одинаковый размер кластеров, но он отыскивает кластеры, которые разделены наилучшим образом.

Рассмотрим набор данных с n записями и тремя переменными (x, y, z) . Разделим данные на $K = 4$ кластеров. Это значит отнесение каждой записи (x_i, y_i, z_i) к кластеру k . После отнесения n_k записей к кластеру k центром кластера $(\bar{x}_k, \bar{y}_k, \bar{z}_k)$ является среднее значения точек в кластере [37]:

$$\begin{aligned}
\bar{x}k &= \frac{1}{nk} \sum_{i \in \text{кластер } k} x_i \\
\bar{y}k &= \frac{1}{nk} \sum_{i \in \text{кластер } k} y_i \\
\bar{z}k &= \frac{1}{nk} \sum_{i \in \text{кластер } k} z_i
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Сумма квадратов внутри кластера задаётся следующей формулой [37]:

$$SS_k = \sum_{i \in \text{кластер } k} (x_i - \bar{x}k)^2 + (y_i - \bar{y}k)^2 + (z_i - \bar{z}k)^2 \tag{2.3}$$

Метод k-means отыскивает такое отнесение записей к кластерам, которое минимизирует внутрикластерную сумму квадратов по всем четырём кластерам $SS_1 + SS_2 + SS_3 + SS_4$ [37].

$$\sum_{k=1}^4 SS_k \tag{2.4}$$

При реализации кластеризации использовался язык программирования Python в среде Jupyter Notebook, веб-приложении, предназначенном для создания вычислительного кода и обмена им. Был интегрирован модуль Scikit-learn, предлагающий полный набор современных алгоритмов машинного обучения, подходящих для выполнения задач с обучением и без.

В применении кластерного анализа к выделению водных масс можно определить *центроиды* – центры скопления точек в трёхмерном пространстве кластеризации (температура – солёность – концентрация силикатов) и характеризующие средние значения каждого параметра в классе, а также *метки* – географическое положение точек, принадлежащих отдельным классам.

Перед проведением кластеризации необходимо провести стандартизацию данных для того, чтобы какая-либо из переменных чрезмерно не влияла на модель просто в силу шкалы её исходных показаний измерений [37]. Стандартизация помещает все переменные на схожие шкалы путём вычитания среднего и деления на стандартное отклонение по формуле:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{s} \quad (2.5)$$

2.2.3 Расчёт объёмов каждого класса

Методика и технология проведения классификации водных масс позволяют рассчитать количество воды, образованной отдельными классами за каждый момент времени. Расчёт площади ячейки между точками в пространстве был выполнен по формулам:

$$\begin{aligned} \text{lat} &= \Delta\varphi \cdot 60 \cdot 1852 \\ \text{lon} &= \Delta\varphi \cdot 60 \cdot 1852 \cdot \cos(\Delta\varphi / 2) \\ S &= \text{lat} \cdot \text{lon} \end{aligned} \quad (2.6)$$

где $\Delta\varphi$ – расстояние между точками сетки данных, которое составляет 0.25° ; значение $\cos(\Delta\varphi / 2)$ должно быть посчитано в радианах; численные коэффициенты 1852 и 60 обозначают количество метров в одной морской миле и количество минут в градусе долготы соответственно. Количество минут для градуса широты рассчитывалось в зависимости от широты точки.

Для расчёта объёма конкретного класса, полученное значение площади ячейки умножалось на толщину слоя в зависимости от горизонтов наблюдений и на количество ячеек выбранного класса.

Также для достижения результата использовались модули Python: «pandas», «numpy», «netCDF4», «matplotlib», «math», «csv». Расчётный код приведен в приложении А.

2.2.4. Статистические вычисления и вейвлет-анализ

В данном исследовании применяется одномерная статистика, рассчитанная в табличном редакторе Microsoft Office Excel, и включает в себя следующие методы:

– расчёт трендовой составляющей: этот метод позволяет выявить общую тенденцию изменения данных во времени. Все тренды были проверены на значимость по коэффициенту детерминации;

– корреляционный анализ: предоставляет информацию о наличии, либо же отсутствии связи между двумя характеристиками.

Для всех методов осуществлялась проверка на значимость статистических параметров посредством сравнения критического t -критерия Стьюдента (при $\alpha=0.05$) с его эмпирическим значением t^* .

Для рассчитанных объёмов выбранных классов был выполнен вейвлет-анализ, устраняющий недостатки спектрального анализа и позволяющий исследовать каждый масштаб колебаний (интенсивность, изменения периода, локализацию во времени) с необходимой достаточной разрешающей способностью.

Глава 3. Пространственно-временная изменчивость верхнего распреснённого слоя Карского моря

3.1 Обнаружение пространственных границ верхнего распреснённого слоя Карского моря

Верхний сезонный распреснённый слой Карского моря представляет собой важную часть его гидрологического режима. Данный слой формируется за счёт пресного стока, поступающего в море с речным объёмом вод и из-за таяния снега и льда в тёплый период. Протяжённый распреснённый слой образует неоднородную термохалинную стратификацию водной толщи, разделяя на её две основные части: относительно тёплый пресный, богатый взвесью слой, обособленный от холодных, солёных, нижележащих вод моря [39].

Для представления зависимости распределения гидрометеорологических параметров в Карском море и динамики плюма в водной толще, а также для определения ориентировочной глубины залегания нижней границы распреснённого слоя, рассмотрим следующие поля распределения и разрезы, построенные по модельным данным реанализов GLORYS12V1 (температура и солёность воды) и PISCES (концентрация силикатов в воде) (рисунки 3.1 - 3.3). По данным исследований [5, 25], максимальные значения расхода рек Обь и Енисей приходятся на период с мая по июль, а минимальные – на март - апрель, поэтому, для выявления сезонных отличий в значениях гидрометеорологических характеристик, поля распределения характеристик на поверхности и разрезы построены для 6 месяцев в году. Для примера используем 2007 год, так как он является интересным с точки зрения выявленных длиннопериодных колебаний солёности. Глубина разрезов составляет 20 метров, так как считается, что распреснённая вода глубже этой границы не проникает [22].

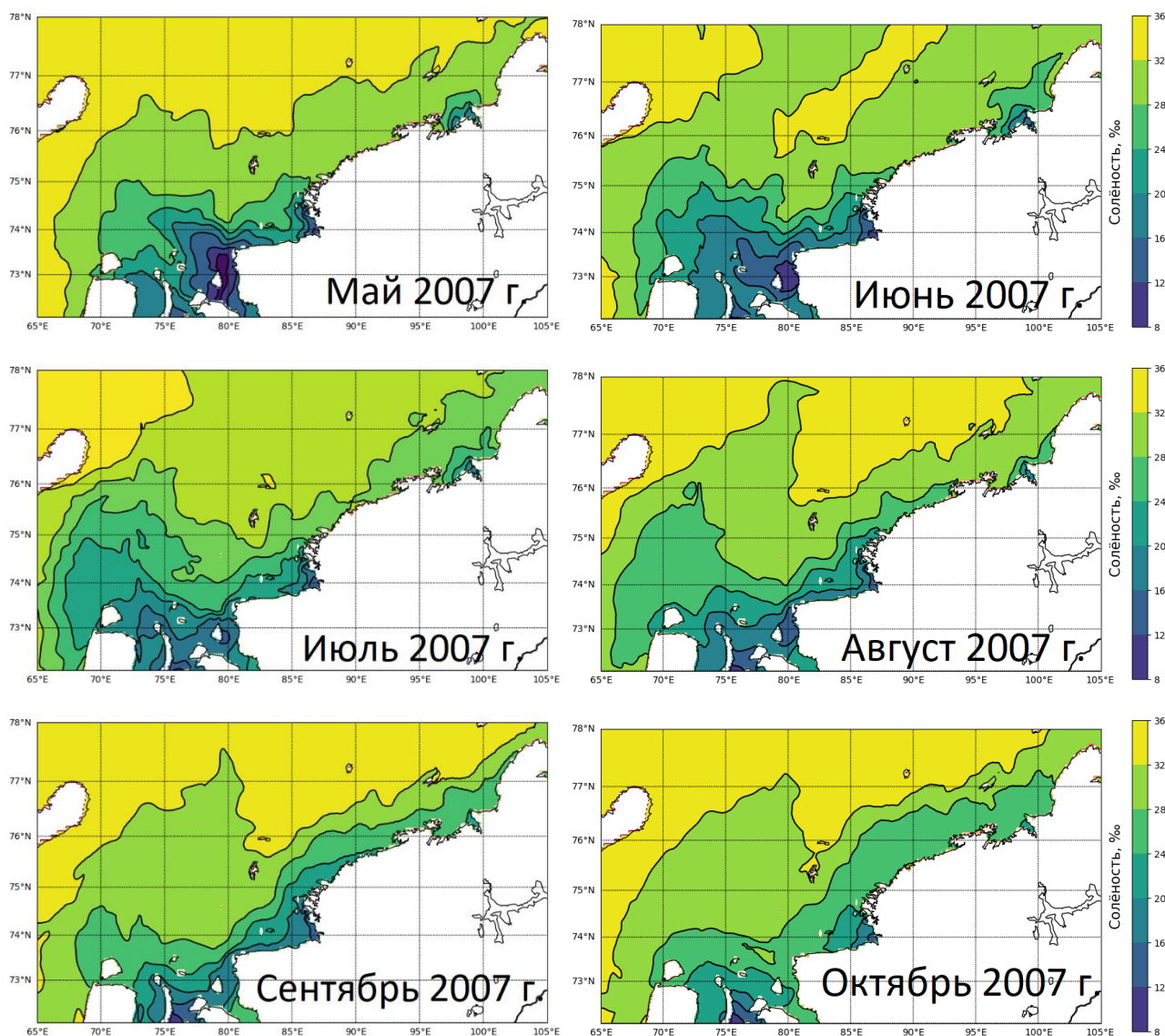


Рисунок 3.1 – Распределение солёности на поверхности Карского моря за май - октябрь 2007 года.

Карты распределения солёности в Карском море (рисунок 3.1) демонстрируют, что начало интенсивного речного стока из Енисея начинается в мае, а для Оби – в июне, что подтверждается исследованиями [2, 25]. В июле наблюдается обширная область опреснения моря к северу от полуострова Ямал, которая достигает берегов архипелага Новая Земля с солёностью от 20 ‰ до 28 ‰ в зависимости от удаления от эстуария Оби-Енисея.

В августе - сентябре можно наблюдать, как накопленный объём распреснённой воды в центральной части Карского моря начинает постепенное движение на северо-восток вдоль полуострова Таймыр под действием силы

Кориолиса, системы течений моря и стремлением воды уравновесить накопившийся объём [2, 27]. В тот же период времени происходит и другой процесс: разделение плюмов от Оби и Енисея на два различных объёма распреснённой воды, что можно предположить по рисункам, отображающих солёность поверхности Карского моря за июль и август 2007 года. Большой объём Обской воды распространяется прямо к северу в июне - июле, образуя западный и центральный плюмы, а основной объём вод, вышедший из Енисейского залива в мае - июне, уже менее интенсивно вытекает из него и немного разворачивает своё направление движения в северо-восточном направлении [22, 23]. Таким образом, образуется отдельное прибрежное течение Енисейской воды вдоль полуострова Таймыр в северо-восточном направлении, отделённое от Обской воды промежуточными водами [20]. В октябре видны последствия этой картины: прибрежное течение вдоль полуострова Таймыр утолщается и изогалины 25 ‰, 28 ‰ смещаются к северу от побережья, демонстрируя активный перенос распреснённой воды к проливу Вилькицкого. Фронтальная зона, которая проходит по изогалине 28 ‰, хорошо отображает динамику распреснённого слоя со временем на поверхности Карского моря.

Анализируя карты распределения температуры на поверхности Карского моря за май - октябрь 2007 года (рисунок 3.2), по видимым значениям параметра, можно сказать, что основной процесс ледотаяния начинается в мае - июне, когда тёплые воды Ямальского течения приносят с юга моря уже тёплую растаявшую воду к эстуарию Оби-Енисея, где температура и так выше окружающей морской, так как воды эстуария берут своё начало из тёплых регионов материка [17]. С течением времени температура изменяется с относительно высокой на юго-западе моря до более низкой на северо-востоке, что обуславливается широтной изменчивостью и зонально-меридиональной системой течений [7]. В целом, по данным картинам распределения температуры на поверхности Карского моря за 2007 год, довольно трудно сказать, оказывает ли речной сток решающую роль в изменении температуры поверхности моря на более высокую, чем окружающего

его моря. Заметно лишь, что в сентябре объём тёплой воды совершает своё движение к проливу Вилькицкого.

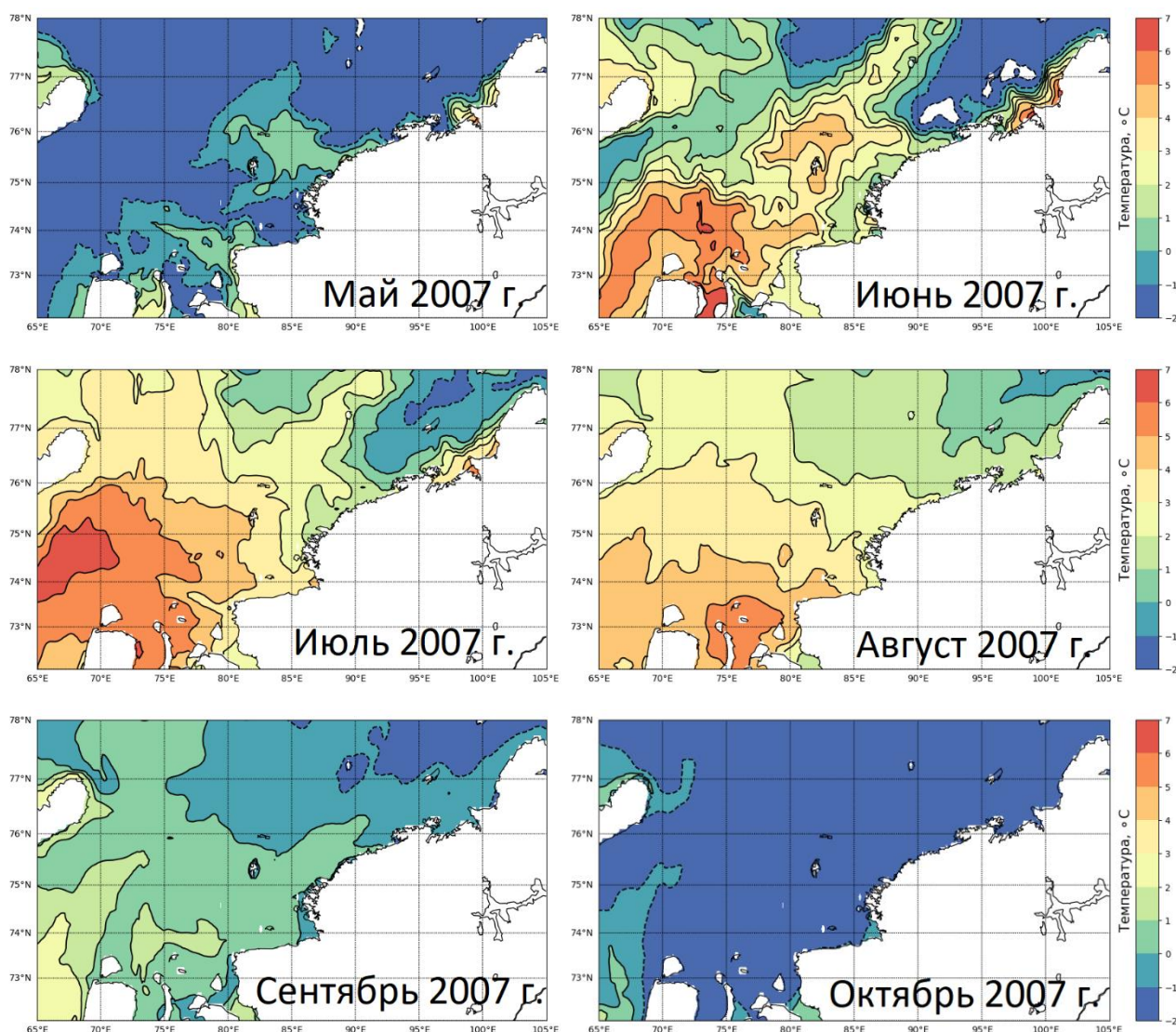


Рисунок 3.2 – Распределение температуры на поверхности Карского моря за май - октябрь 2007 года.

Карты распределения содержания силикатов в воде на поверхности Карского моря за май - октябрь 2007 года (рисунок 3.3) хорошо демонстрируют разделение акватории на 2 зоны: богатую взвесью, а значит и силикатами, массу воды вблизи эстуария Оби-Енисея и бедную фоновую массу Арктических вод на севере моря. Примечательно, что на всех картинах концентрация силикатов в

воде в Обской губе почти в 2 раза больше, чем в Енисейском заливе, что связано с разным типом почв водосборов каждой из рек [25].

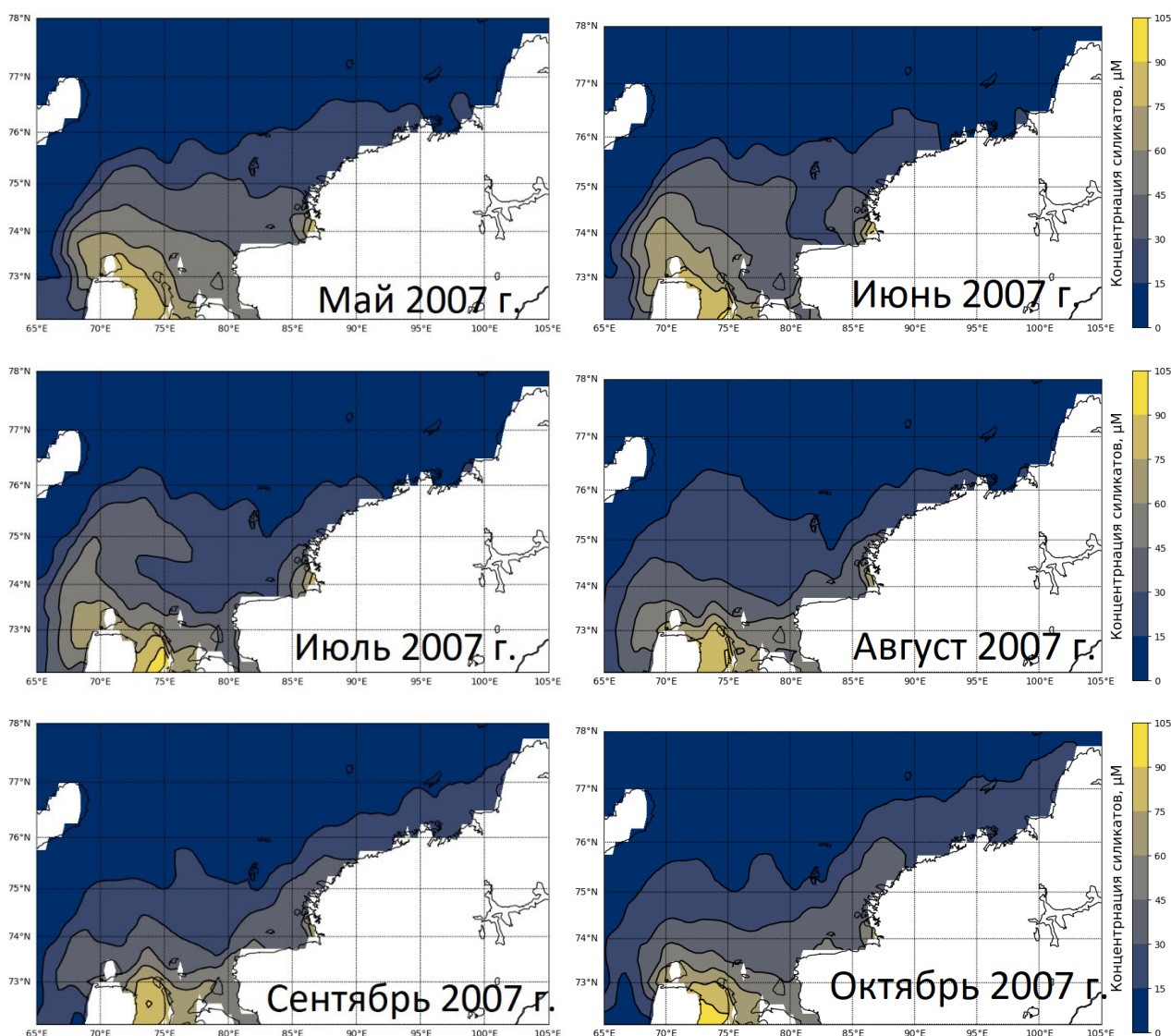


Рисунок 3.3 – Распределение концентрации силикатов на поверхности Карского моря за май - октябрь 2007 года.

Можно наблюдать очень схожую динамику изолинии 60 μM концентрации силикатов с положением фронтальной изогалины 28 ‰ солёностной зоны, показанной на рисунке 3.1. В зависимости от удалённости от эстуария Оби-Енисея, концентрация силикатов в воде снижается, что подтверждается исследованием [23]. Также по значениям характеристики хорошо заметен перенос речной водной массы на северо-восток. Можно сказать, что значение

солёности воды имеет обратную связь со значениями концентрации силикатов в воде, так как чем больше перемешана речная, богатая кремнием, вода с морской, тем выше поднимется её солёность и тем ниже опустятся значения растворённого кремния в воде. В целом, распределения значений концентрации силикатов в воде на поверхности моря со временем явно показывают разделение моря на поверхностный распреснённый слой и воды других типов.

Для выявления пространственно-временной динамики верхнего распреснённого слоя не только на поверхности Карского моря, но и до глубины 20 метров, по данным из того же массива были построены 5 зональных разрезов через всё море (рисунок 3.4): первый на широте 73.5° с. ш., второй – 74.3° с. ш., третий – 74.8° с. ш., четвёртый – 75.5° с. ш. и пятый - 76.6° с. ш. Данные разрезы построены почти через всю акваторию Карского моря, показывая распределение солёности в зависимости от удаления от эстуария Оби-Енисея.

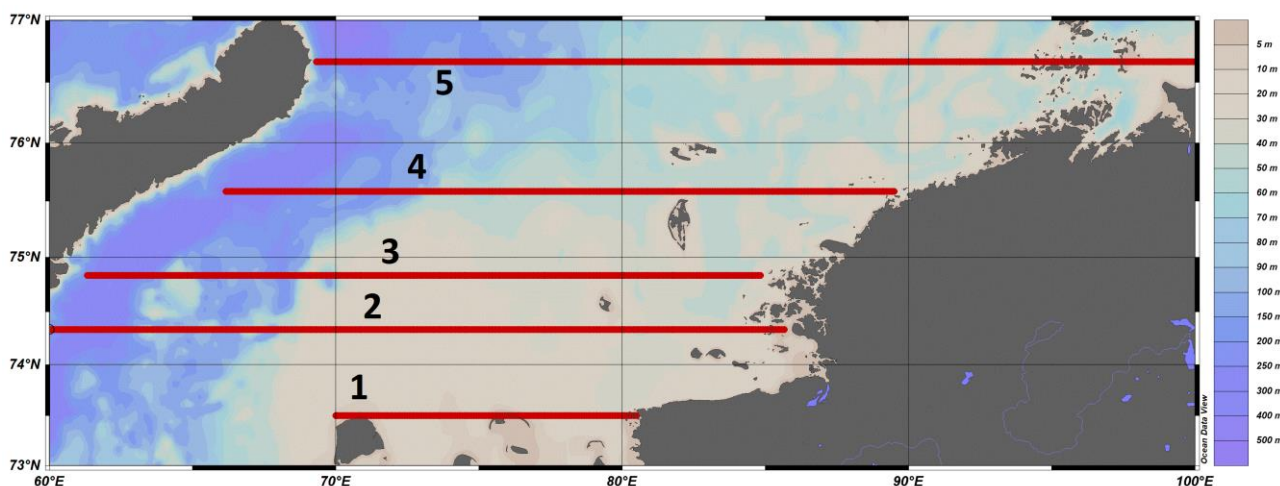


Рисунок 3.4 – Нумерация разрезов и их расположение на карте исследования.

Красными линиями обозначены разрезы. Цветовой шкалой обозначены глубины.

Полученные разрезы демонстрируют следующую динамику водных масс (рисунок 3.5): менее плотная и пресная волна половодья реки Енисей в мае - июне в большом количестве вытекает из Енисейского залива и стремится занять

восточное положение акватории моря, примыкая к побережью близлежащих участков суши из-за ветрового воздействия на акваторию и силы Кориолиса.

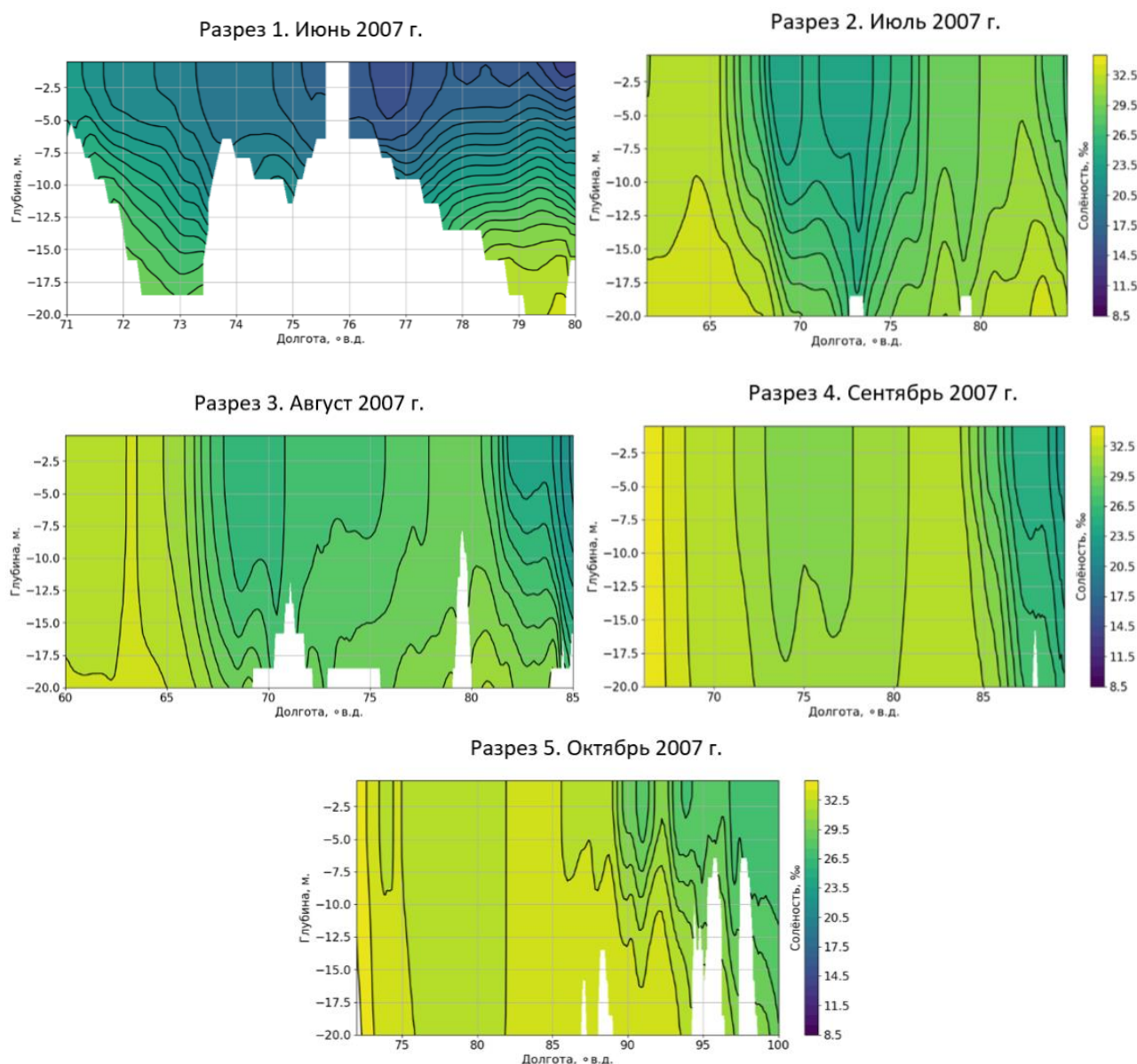


Рисунок 3.5 – Распределение солёности на зональных разрезах через Карское море до глубины 20 метров для июня - октября 2007 года.

В то же время, воды Оби, попадающие в акваторию Карского моря в течение месяца после попадания в море вод Енисея, следуют прямо на север, смешиваются с оставшимися водами Енисея, в дальнейшем растекаясь на северо-запад и северо-восток, распределяясь, теряя концентрацию силикатов, а также уменьшая толщину верхнего опреснённого слоя [5, 25, 26]. Затем, Енисейская

вода узкой полосой всё также движется на северо-восток вдоль побережья полуострова Таймыр, а Обская вода продолжает растекаться во всех направлениях по площади Карского моря, со временем смещаясь на восток, что отчётливо видно на третьем разрезе в июле, четвертом разрезе в августе и пятом разрезе в сентябре.

Между объёмами распреснённой Енисейской и Обской водных масс появляется промежуточная водная масса, с более высокой солёностью, чем в опреснённых водах, что хорошо видно по возникающему градиенту солёности между ними и подтверждается в исследовании [20].

По рисункам 3.1 и 3.5 можно отметить, что, чем дальше распреснённый объём воды распространился от самого южного до самого северного разреза, тем большую зональную протяжённость этот объём занимает, тем большую солёность обретают распреснённые водные массы, и тем меньше становится глубина залегания галоклина, что связано с естественным гидродинамическим растеканием жидкости с малой плотностью на поверхности более плотной жидкости, а также за счёт ветрового воздействия на водную поверхность, которое происходит в безлёдный период года [26, 27, 29].

По распределению солёности за весь 2007 год на первом разрезе в восточной его части характеристика не превышает 25 ‰, достигая даже 5 ‰, что обусловлено мелководным участком акватории Карского моря, всего около 28 метров, вблизи эстуария Оби-Енисея, где стратификация водной толщи будет максимально непостоянной [23]. Такое изменение солёности напрямую связано с половодьями, вызванными таянием льда и снега весной. Так как эстуарии обеих рек находятся на северном побережье Евразийского континента, необходимо время, чтобы тёплая талая вода попала в Арктический регион, что и объясняет минимум значений солёности воды летом, а не весной, когда наблюдается максимум солёности воды.

Разрезы для западной части Карского моря (к западу от полуострова Ямал) не приводились, так как влияние речного стока на стратификацию моря в данной части существенно меньше, чем к востоку от полуострова Ямал, что обусловлено

вышеперечисленными гидродинамическими факторами, влияющими на перемещение опреснённых объёмов воды. Солёность в данной части моря не достигает таких малых значений, как в вышеописанных разрезах. Стоит сказать, что опреснённый слой всё же проникает к западным берегам полуострова Ямал, преимущественно из Оби и стремится занять восточное положение на акватории. В некоторые месяцы опреснённый слой появляется не только у берегов полуострова Ямал, но и по всей протяженности моря, что вызвано сезонным таянием льда на всей акватории моря [7, 40].

По результатам исследованных полей и разрезов за весь период исследования 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. Показателем наличия верхнего распреснённого слоя служат значения солёности и концентрации силикатов в воде, которые имеют между собой обратную связь.

Следующим шагом работы стало выявление пространственно-временной изменчивости верхнего распреснённого слоя Карского моря посредством кластеризации водных масс, рассмотренное в следующей подглаве.

3.2 Выявление пространственно-временной изменчивости верхнего распреснённого слоя Карского моря посредством классификации водных масс

3.2.1. Выявление климатической изменчивости центроидов каждого из признаков классификации водных масс

Перед кластеризацией значения трёх признаков интерполировались методом триангуляции для приведения к одинаковой пространственной сетке, а также стандартизировались для получения качественного результата классификации. Подробнее о подготовке массивов данных и триангуляции см. в главе 2.

Для дальнейшего анализа пространственно-временной изменчивости верхнего распреснённого слоя Карского моря был проведён кластерный анализ. Выбор кластерного анализа как метода идентификации отдельных водных масс в отличие от классического двумерного T-S-анализа позволяет увидеть трёхмерную динамическую структуру массы воды с отдельными океанологическими характеристиками в трёхмерной системе координат (широта, долгота, глубина), а также отследить динамику центроидов классов на трёхмерной диаграмме, где каждое из измерений диаграммы представляет собой шкалу изменения признака классификации.

Кластеризация проводилась методом k-means с разделением на 4 класса, с учётом существующих водных масс, фиксируемых в Карском море в данном регионе. Среди них есть пресные речные воды, находящиеся в непосредственной близости от эстуариев рек; поверхностные распреснённые воды Карского моря, генерируемые либо смешиванием талой воды ото льда с морской, либо дальнейшего смешивания пресных вод с увеличением расстояния от эстуариев за счёт конвекции и адвекции с нижележащими морскими водами; а также воды Арктического бассейна и воды Баренцева моря, в основном взаимодействующие с другими водами в северных регионах моря, составляющие основной объём водных масс в регионе [17]. Расчёт был проведен для каждой точки в трёхмерном пространстве для каждого момента времени с января 1993 по июнь 2021 года.

Инициализация начальных центроидов для каждого из классов проводилась по трём признакам исследуемого домена: температуре воды, солёности и концентрации силикатов в воде и осуществлялась по двум факторам: с учётом общедоступных данных в научных работах по разделению водных масс в Карском море и методу локтя – общепринятому подходу, который состоит в

выявлении точки, когда набор кластеров объясняет большую часть дисперсии в данных [17, 37]. Добавление новых кластеров вне этого набора вносит относительно малый вклад в объяснённую дисперсию. Локоть – точка, где кумулятивная объяснённая дисперсия сглаживается (выходит на плато) после крутого подъёма (рисунок 3.6).

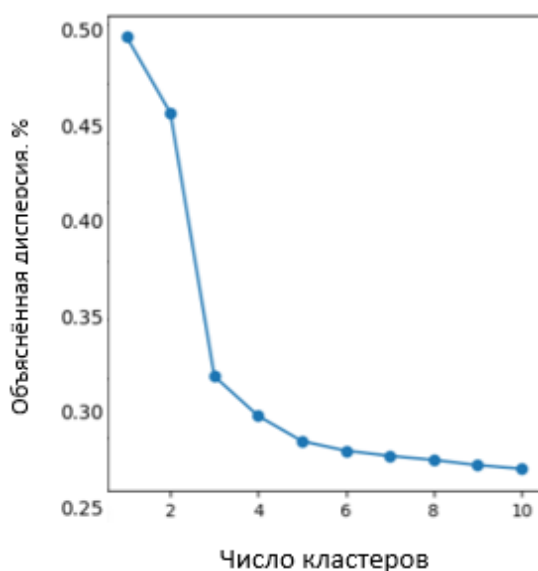


Рисунок 3.6 – Метод локтя для данных по водным массам Карского моря.

Поэтому были выделены следующие классы (таблица 3.1):

- класс «0» – класс распреснённой воды (переходный класс от сильно распреснённых вод к морским) с значениями солёности от 20 ‰ и более низкой температурой воды и низкой концентрацией силикатов, чем для класса «1»;
- класс «1» – класс смешанных речных вод с относительно высокими значениями температуры, низкими значениями солёности от 5 ‰ до 20 ‰ и высокими значениями концентрации силикатов, так как эти воды напрямую попадают в море из эстуария Оби-Енисея;
- класс «2» – класс морской воды с самыми низкими значениями температуры, высокой солёностью и низкой концентрацией силикатов;
- класс «3» – класс, образованный смешанной с морской талой водой ото льда, в которой наблюдается относительно высокие значения температуры, низкие значения солёности и фоновые значения концентрации силикатов.

Таблица 3.1 – Значения начальных центроидов характеристики для каждого из классов

Класс	Концентрация силикатов в воде, μM	Солёность воды, ‰	Температура воды, $^{\circ}\text{C}$
0	16.0	20.0	0.0
1	60.0	10.0	4.0
2	16.0	33.5	-1.7
3	16.0	33.5	2.0

В процессе кластеризации методом k-means классы идентифицируются как водные массы, обозначенные выше, а центроиды – как ядра водных масс до перемешивания. Затем, в процессе кластеризации и перемешивания водных масс начальные центроиды в вершинах треугольников кластеризации смещаются к реальным своим положениям в пространстве, показывая реальные ядра водных масс, то есть показывают среднее состояние конкретного объёма воды.

Для анализа пространственно-временной изменчивости центроидов за каждый месяц изобразим полученные точки пространства за временной интервал, исследуемый выше, принадлежащие к одному из классов, на трёхмерной диаграмме, оси которой составляют солёность, температуру воды и концентрацию силикатов в воде (рисунок 3.7).

По данным диаграммам отчётливо видно, как классификационный алгоритм определяет принадлежность точки пространства с тремя признаками к тому или иному классу: «0» – образованному смешанной распреснённой водой, «1» – образованному речной водой, «2» – образованному морской водой и «3» – образованному смешанной талой водой от льда. Становится понятно, что, чем выше значения концентрации силикатов и чем ниже значения солёности, в любом диапазоне температур, тем выше вероятность определения точки к классу «1». При снижении значений концентрации силикатов и увеличении значений солёности уже можно проследить, как образуется класс «0».

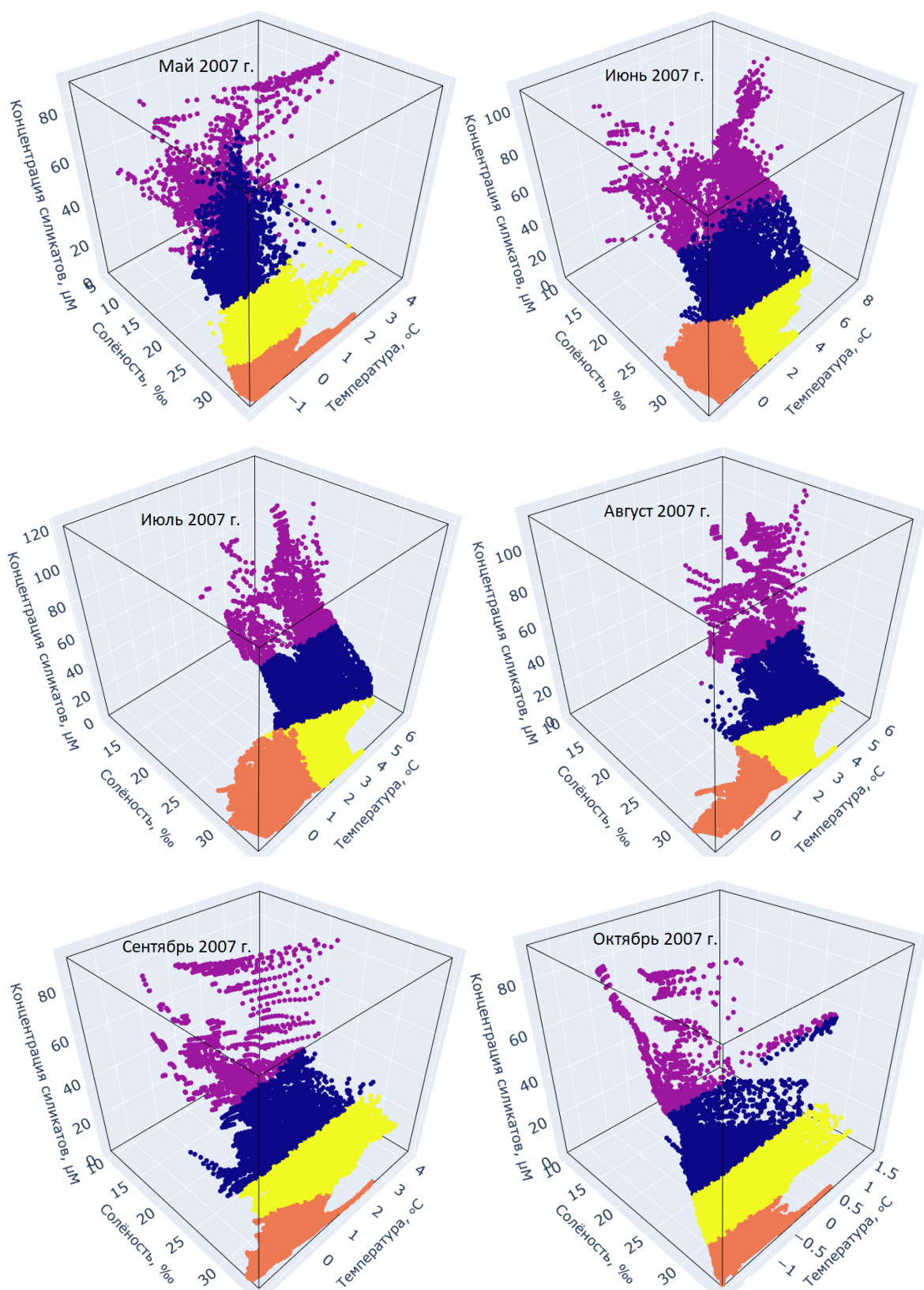


Рисунок 3.7 – Распределение точек кластеризации в толще Карского моря на T-S-Si-диаграмме за май - октябрь 2007 года. Распреснённый класс «0» обозначен синим цветом, пресный класс «1» – фиолетовым, класс «3» - жёлтым и класс «2» - оранжевым.

Для классов «2» и «3» часто характерны схожие значений концентрации силикатов и значений солёности: значения концентрации силикатов малы, а значения солёности близки к фоновой морской солёности, что явно отделяет эти два класса от «0» и «1» и указывает на их не речное происхождение, но обычно класс «3» имеет более высокие значения концентрации силикатов и низкие значения солёности по сравнению с классом «2». В классе «2» наблюдаются самые холодные, самые солёные и самые бедные силикатами Арктические воды, которые и составляют основной объём Карского моря.

Со временем положение точек изменяется: происходит их смещение в правую область диаграммы, в сторону возрастания значений температуры и, в меньшей степени, вверх, в сторону возрастания значений концентрации силикатов, а затем, в сентябре - октябре происходит их смещение на исходные позиции, что напрямую связано с гидрометеорологической сезонностью изменений водной толщи Карского моря в отношении влияния распреснённого стока Оби и Енисея. Всё это происходит с помощью автоматической кластеризации методом k-means, смещающей центры классов в зависимости от изменения веса точки в той или иной степени влияния одного из признаков.

На рисунке 3.8 показаны центроиды каждого класса для всех моментов времени: можно отследить, что идентификация класса к той или иной водной массе значительно меняется. Вызвано это тем, что классификационному алгоритму довольно сложно выделить отдельные водные массы со схожими характеристиками при итеративном вычислении центров классов, поэтому происходит их смещение. Пока вычислительные мощности не позволяют выполнить кластеризацию всех 22 407 840 значений за одну итерацию, кардинально увеличив качество классификации.

На рисунке 3.8 отчётливо видно, что все точки преобладают в «холодном» секторе диаграммы, что связано с Арктическим расположением региона, поэтому прослеживается такая специфика водных масс.

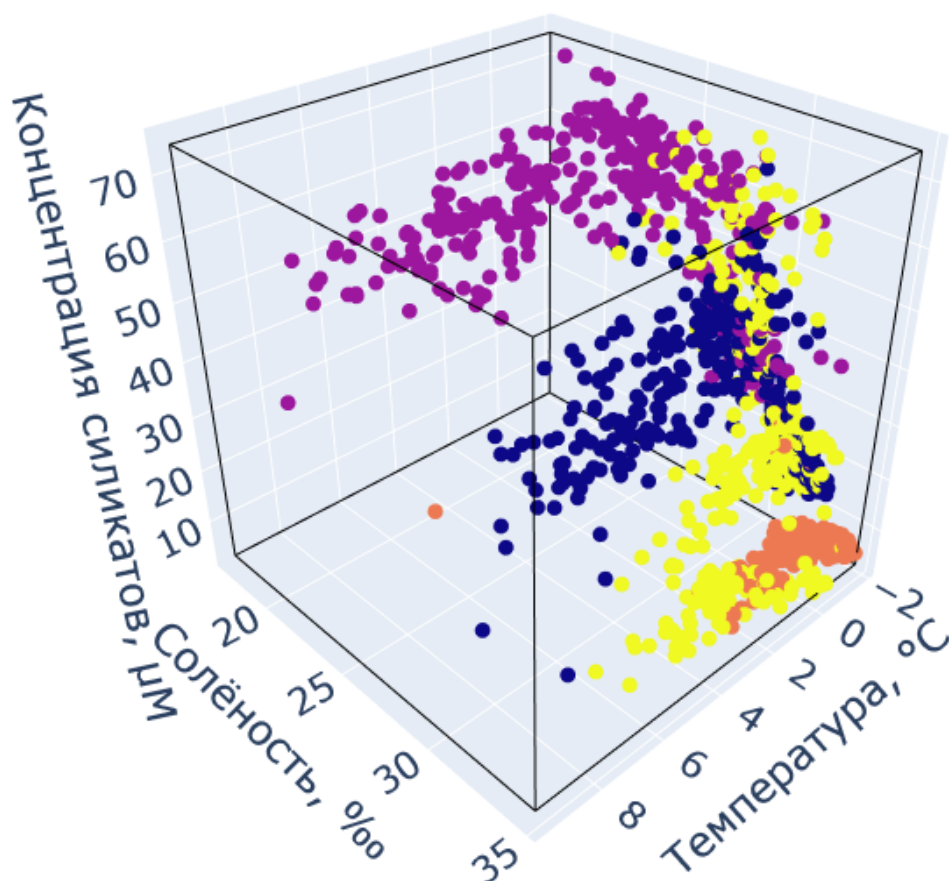


Рисунок 3.8 – Центроиды всех моментов времени для каждого из классов. Распреснённый класс «0» обозначен синим цветом, пресный класс «1» – фиолетовым, ледовый класс «3» - жёлтым и класс «2» - оранжевым.

Также необходимо указать, что класс «2» (морской) находится в холодном, солёном и бессиликатном углу диаграммы, что означает, что классификационный алгоритм хорошо определяет данную водную массу с мало меняющимися океанологическими характеристиками. В дальнейшем исследование для класса «2» не будет проводиться, так как этот класс точно не представляет верхний распреснённый слой Карского моря и не входит в цель работы.

Центроиды классов были выделены для каждого момента времени в зависимости от признака. Графики временной изменчивости центроидов для каждого признака представлены на рисунках 3.9 - 3.11. Заметно, что с момента инициализации начальных центроидов, они существенно меняют свои значения,

что, возможно, связано с тем, что расчёт производился для акватории с непостоянной гидрологической стратификацией водной толщи, а значит, в зависимости от сезона и конкретного года, океанологические параметры могли существенно меняться во времени. Кроме того, для кластеризации использовалось пространство с большим диапазоном значений для каждого из признаков. Так, изменения значений солёности между классами составляют от 20 ‰ до 30 ‰, изменения значений температуры от 5 °C до 10 °C и изменения значений концентрации силикатов от 30 μM до 50 μM .

Характерной особенностью временной изменчивости центроидов для каждого из признаков являются сезонные циклические колебания, которые особенно отчётливо видны на графике изменения центроидов температуры (рисунок 3.10). Для центроидов всех характеристик существует такая зависимость от сезона года: максимумы значений центроидов солёности наблюдаются в весенние месяцы, чаще всего в марте - апреле, а минимумы в июле - сентябре; максимумы значений центроидов температуры отображаются в летние месяцы, а минимумы в зимние и весенние месяцы; максимумы значений концентрации силикатов наблюдаются весной, летом и осенью, а минимумы – только весной.

Таким образом, по распределению минимумов и максимумов всех признаков классификации можно сказать, что кластерный анализ улавливает основные колебания океанологических параметров в зависимости от сезонности года в связи с теми процессами половодий и таяния льда, которые происходят в данном регионе.

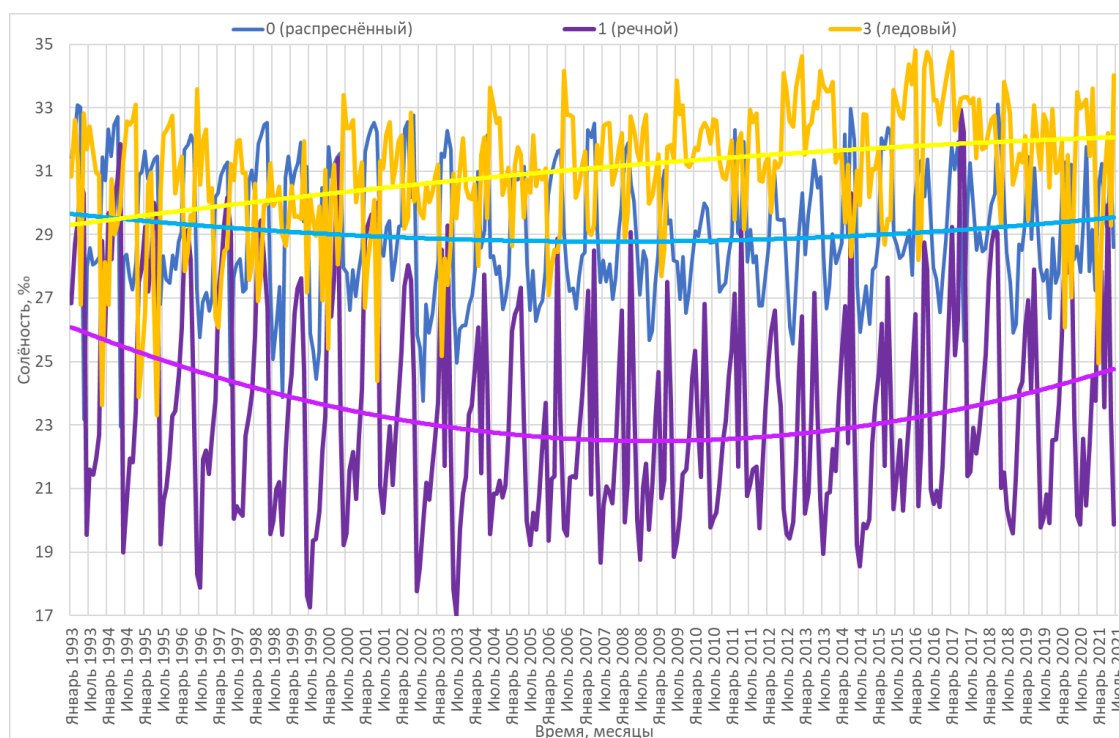


Рисунок 3.9 – Временная изменчивость центроидов солёности и их полиномиальные тренды классов «0», «1» и «3» - распреснённого, речного и ледового, соответственно.

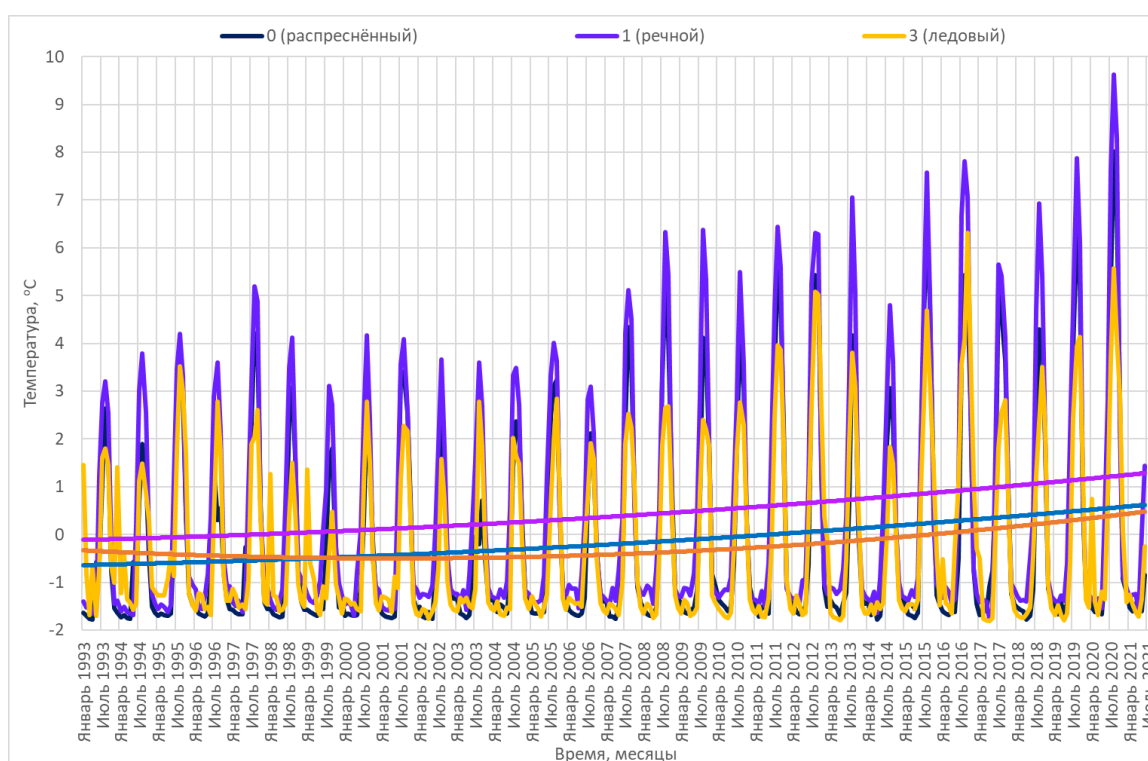


Рисунок 3.10 – Временная изменчивость центроидов температуры и их полиномиальные тренды классов «0», «1» и «3» - распреснённого, речного и ледового, соответственно.

Для выявления изменения значений центроидов для каждого из признаков распредснённого, речного и ледового классов во времени, то есть для оценки их стационарности, были рассчитаны линейные и квадратичные тренды. Все тренды были проверены на значимость по коэффициенту детерминации, и было решено для дальнейшего анализа использовать только квадратичные тренды, так как их коэффициенты детерминации превышают значения коэффициентов детерминации линейных трендов. Характеристики трендов представлены в таблице 3.1.

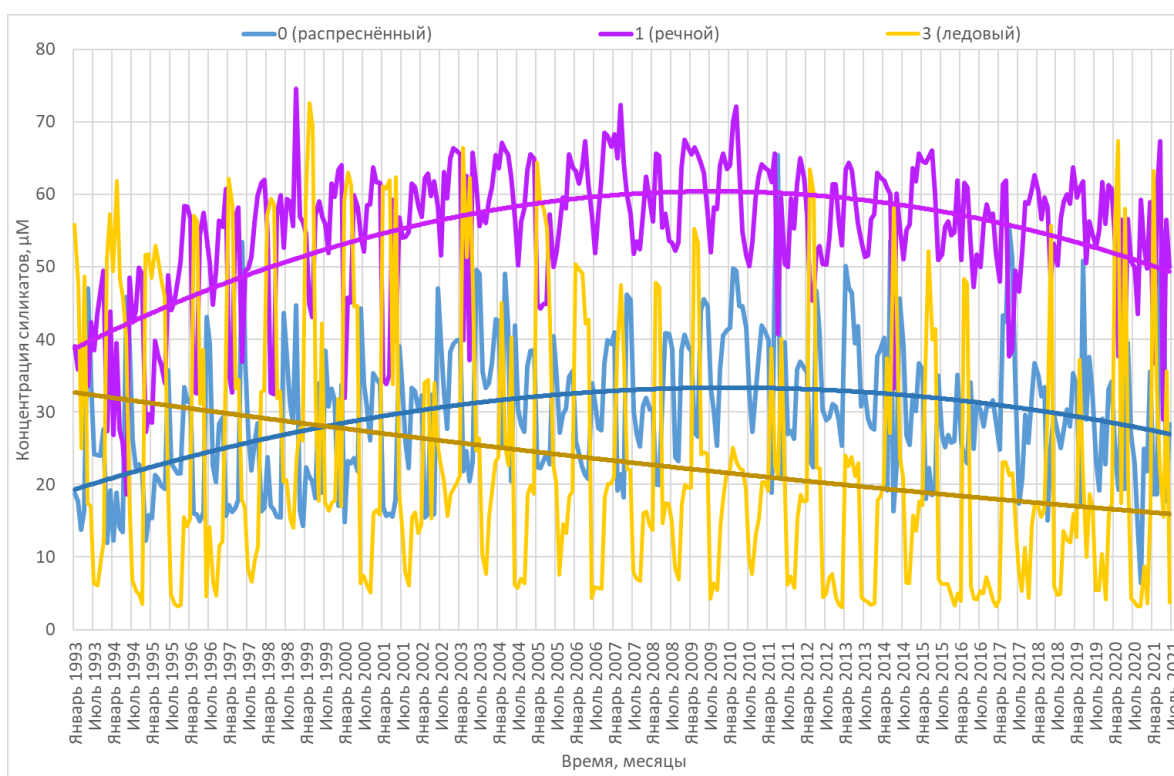


Рисунок 3.11 – Временная изменчивость центроидов концентрации силикатов и их полиномиальные тренды классов «0», «1» и «3» - распредснённого, речного и ледового, соответственно.

Таблица 3.1. Характеристики квадратичных трендов временной изменчивости центроидов для классов «0», «1» и «3».

Признак	Класс	Тренд	Коэффициент детерминации η^2
Солёность	0	$S = 0.000028t^2 - 0.010t + 29.66$	0.014
	1	$S = 0.000099t^2 - 0.038t + 26.12$	0.077
	3	$S = -0.000014t^2 + 0.013t + 29.30$	0.15
Температура	0	$T = 0.0000072t^2 + 0.0016t - 0.12$	0.027
	1	$T = 0.0000066t^2 + 0.0014t - 0.64$	0.03
	3	$T = 0.000017t^2 - 0.0034t - 0.33$	0.025
Силикаты	0	$Si = -0.00034t^2 + 0.14t + 19.20$	0.14
	1	$Si = -0.00055t^2 + 0.22t + 38.53$	0.34
	3	$Si = 0.000040t^2 - 0.063t + 32.75$	0.074

Особенностью полученных квадратичных трендов является то, что максимальный вклад в дисперсию исходного ряда наблюдается у квадратичного тренда центроида концентрации силикатов класса «1» (пресного) (рисунок 3.11). Можно заключить, что модельные значения данных реанализов о концентрации силикатов и имеют тенденцию к уменьшению значений в регионе исследования из-за долговременного природного циклического колебания.

Для дальнейшего анализа временной изменчивости центроидов каждого признака использовался вейвлет-анализ, позволяющий выявить нестационарность процессов и определить масштаб их колебаний на основе частотных компонентов. Рисунки спектров вейвлет-коэффициентов, изображающие информацию об изменении во времени относительного вклада в сигнал компонентов разного масштаба изображены на рисунках 3.12 - 3.13.

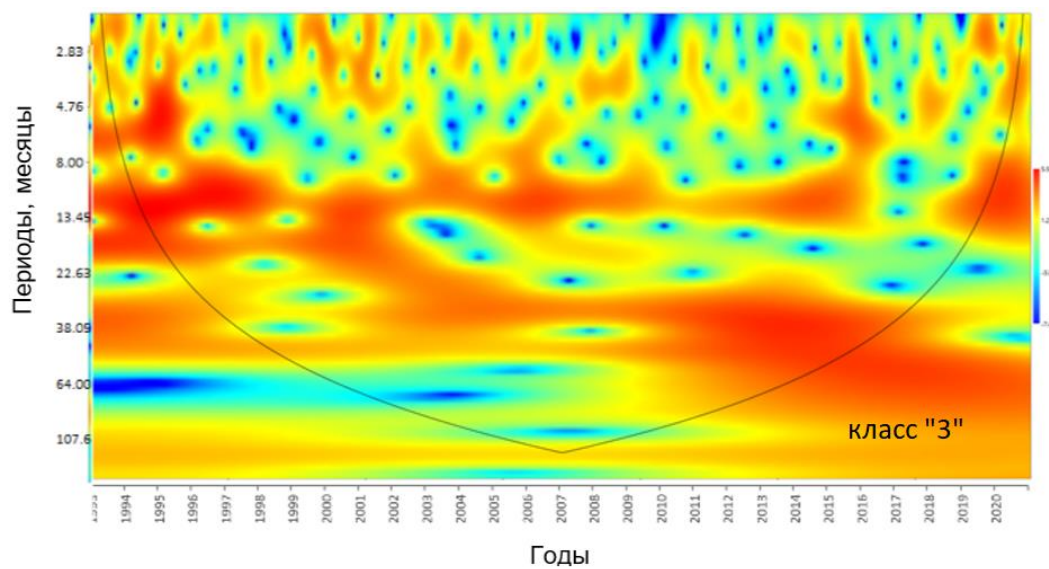
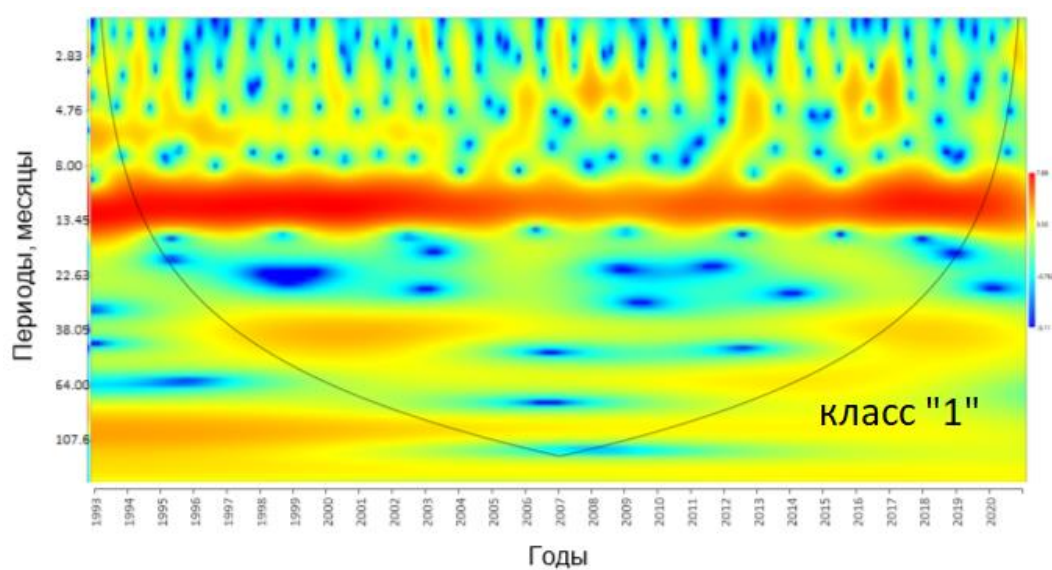
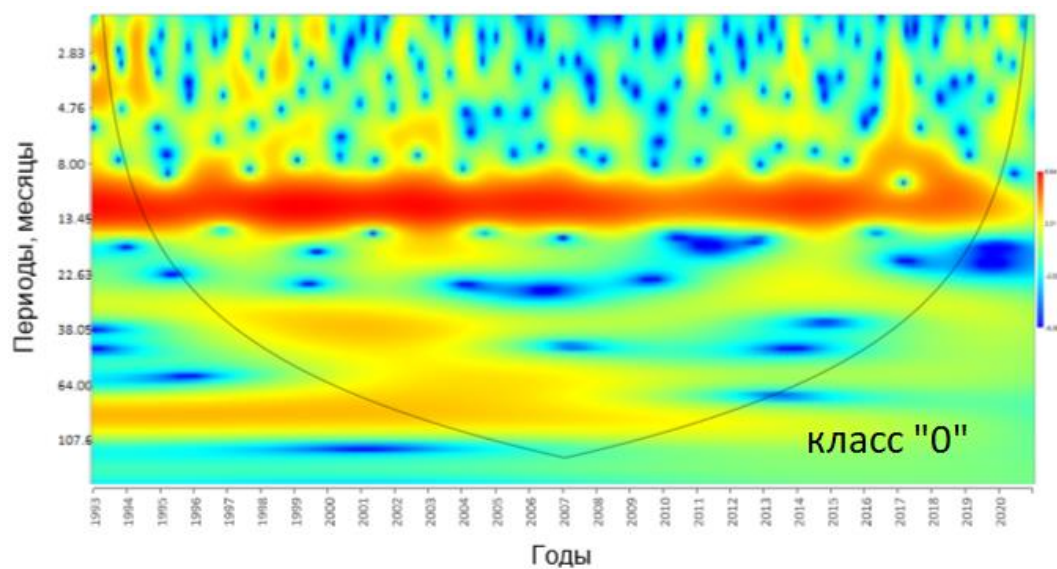


Рисунок 3.12 – Вейвлет-спектр временной изменчивости центроидов солёности для класса «0» (распреснённого), класса «1» (пресного) и класса «3» (ледового).

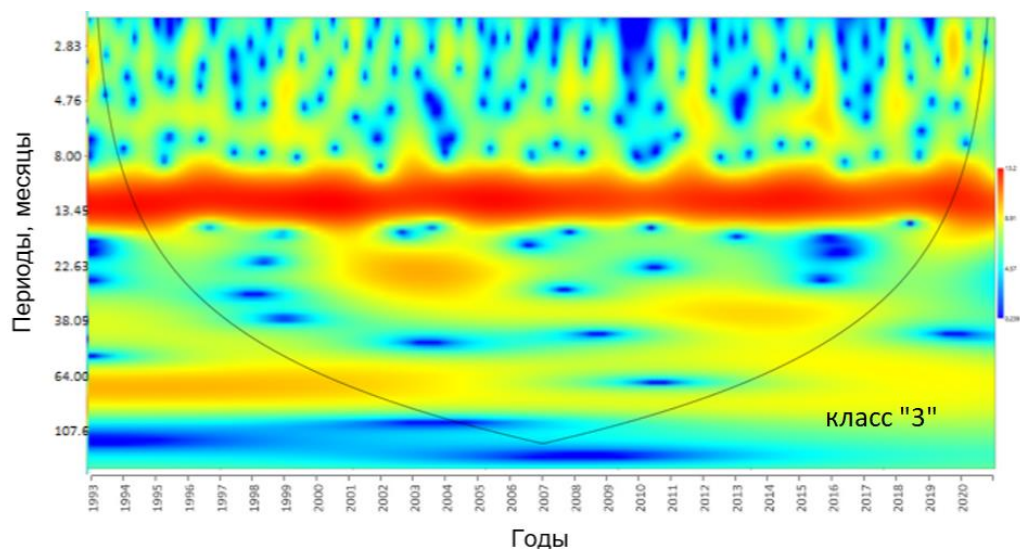
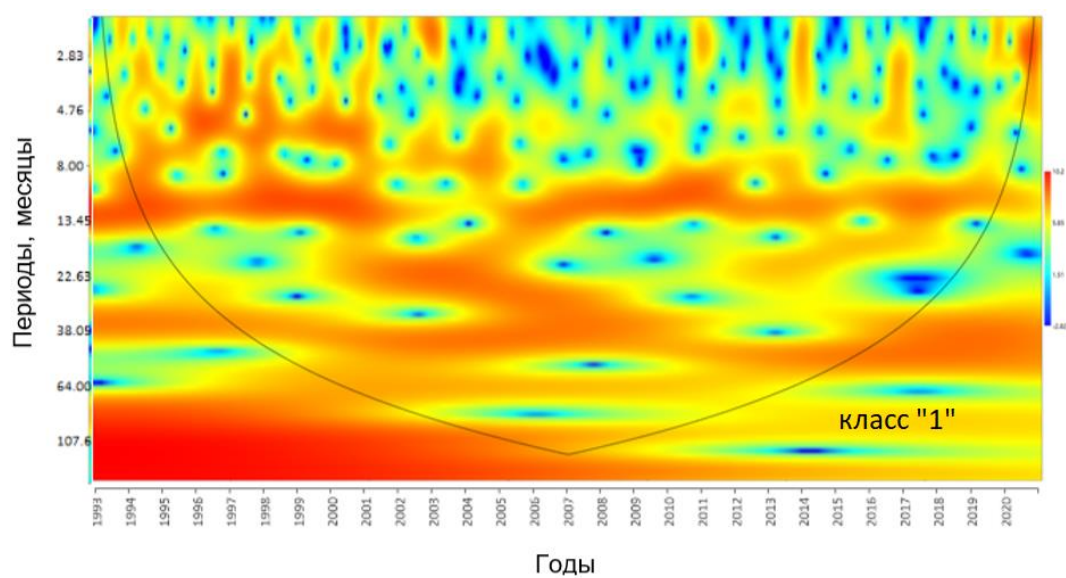
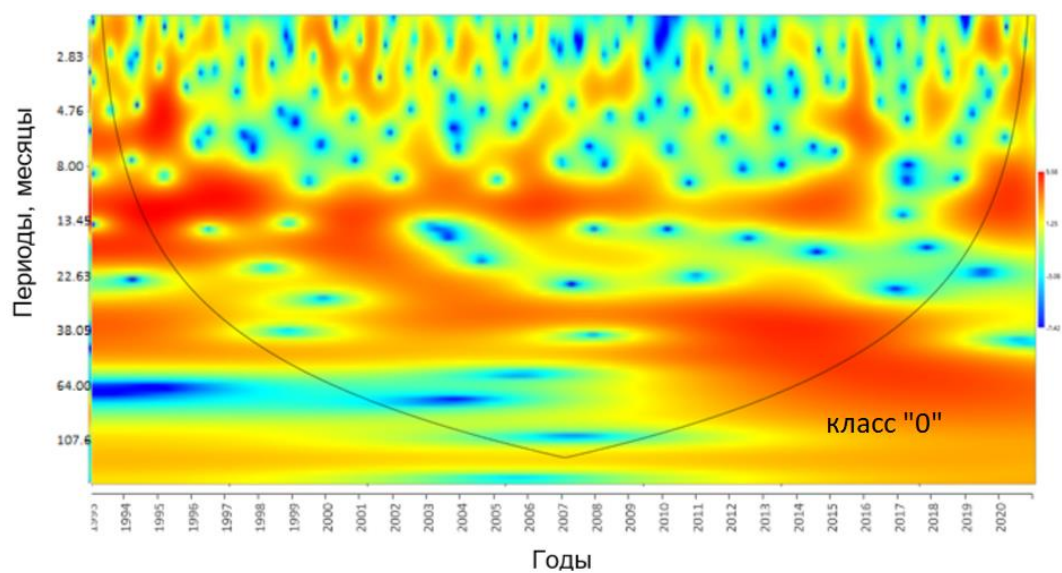


Рисунок 3.13 – Вейвлет-спектр временной изменчивости центроидов концентрации силикатов для класса «0» (распреснённого), класса «1» (пресного) и класса «3» (ледового).

Глядя на рисунок 3.12, можно сказать, что во временной изменчивости солёности «0» (распреснённого) и «1» (пресного) классов преобладает периодическое годовое колебание за весь период исследования. Можно сказать, что процесс распреснения и осолонения для этих классов происходит периодически раз в год, что вызвано обширным стоком рек весной - летом, о чём было сказано выше. Для ледового класса «3» выявляется нестационарность процесса изменения солёности, что может быть вызвано различными непериодическими процессами таяния льда и, соответственно, приводит к непостоянному распреснению воды, что в, в целом, похоже на реальную картину изменения образования и таяния ледяного покрова в Карском море [17].

Для колебаний характеристики центроидов концентрации силикатов для каждого из классов (рисунок 3.13) характерна обратная ситуация: для распреснённого и пресного класса «0» и «1» трудно отследить какое-либо периодическое колебание, тогда как для ледового класса «3» чётко видна годовая изменчивость концентрации силикатов.

На такую периодичность изменения центроидов концентрации силикатов в талой воде от льда, скорее всего, влияет непосредственно процесс ледообразования и ледотаяния: со временем из льда вытекают рассолы, особенно при его таянии, содержащие в себе растворённый кремний, что, вероятно, влияет на минерализацию талой воды. По картам распределения концентрации силикатов на поверхности Карского моря, трудно сказать, достигает ли этот процесс таких больших масштабов, чтобы изменять минерализацию моря.

Для вейвлет-спектрограмм обоих признаков всех классов характерны длиннопериодные колебания характеристик с периодом изменения от 5 до 9 лет. Такое изменение состояния характеристик характерно для процессов нутации Земли или полюсного прилива. В той или иной степени, данные процессы могут оказывать влияние на изменения концентрации растворённых веществ реках, а затем и в море.

Для центроидов температуры вейвлет-анализ не проводился, так как на графике временной изменчивости центроидов (рисунок 3.10) хорошо

отображаются годовые колебания характеристики в связи с летним прогревом вод и одновременного выброса тёплых речных вод в море, но также отмечены и малые «всплески» колебаний температуры в промежутках между основными периодическими колебаниями, что может быть локальными изменениями температуры за счёт внезапных её изменений под влиянием каких-либо гидрометеорологических параметров [17].

3.2.2. Анализ пространственно-временной изменчивости распреснённого, речного и ледового классов

Для визуализации результатов пространственно-временной изменчивости классифицируемых водных масс построим распределение меток кластеров на поверхности моря на примере мая - октября 2007 года (рисунок 3.14). Данный период времени выбран для удобства сравнения полученной классификации водных масс с рисунками из подглавы 3.1 и так как выбранный год хорошо отображает динамику водных масс для всего временного исследования.

На рисунке 3.14 хорошо видны изменения водных масс со сменой сезона года: отлично видна речная вода, (класс «1»), находящаяся вблизи эстуария Оби-Енисея, увеличивая площадь своего покрытия в июне - июле, в связи с половодьем, и уменьшая её к августу - сентябрю. Хорошо видно, как речная вода движется в северо-западном направлении, что характерно для позднего сброса объёма воды Обью, а вдоль побережья полуострова Таймыр прослеживается узкая полоса Енисейской водной массы. Фронтальная зона, образованная классом «0» (распреснённым), максимальные накопленные площади которой отмечаются в июле и августе, начинает перемещение своего объёма в восточном направлении в сентябре-октябре, что подтверждается описанием поверхностного распределения океанологических характеристик в Карском море в подглаве 3.1. Данная водная масса отделяет речную воду от воды, образованной за счёт таяния льда (класс «3»).

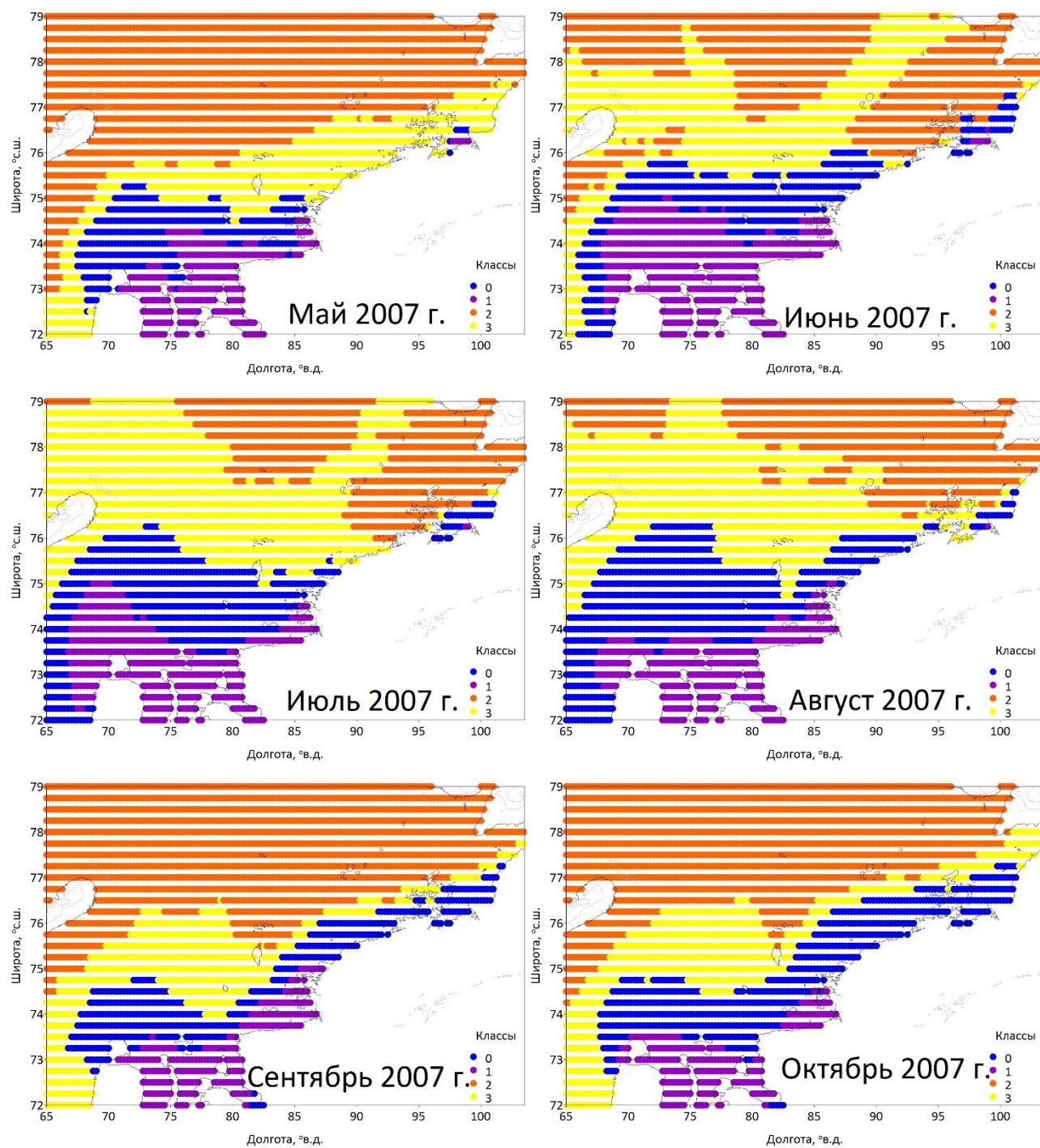


Рисунок 3.14 – Распределение меток кластеров на поверхности Карского моря за май - октябрь 2007 года.

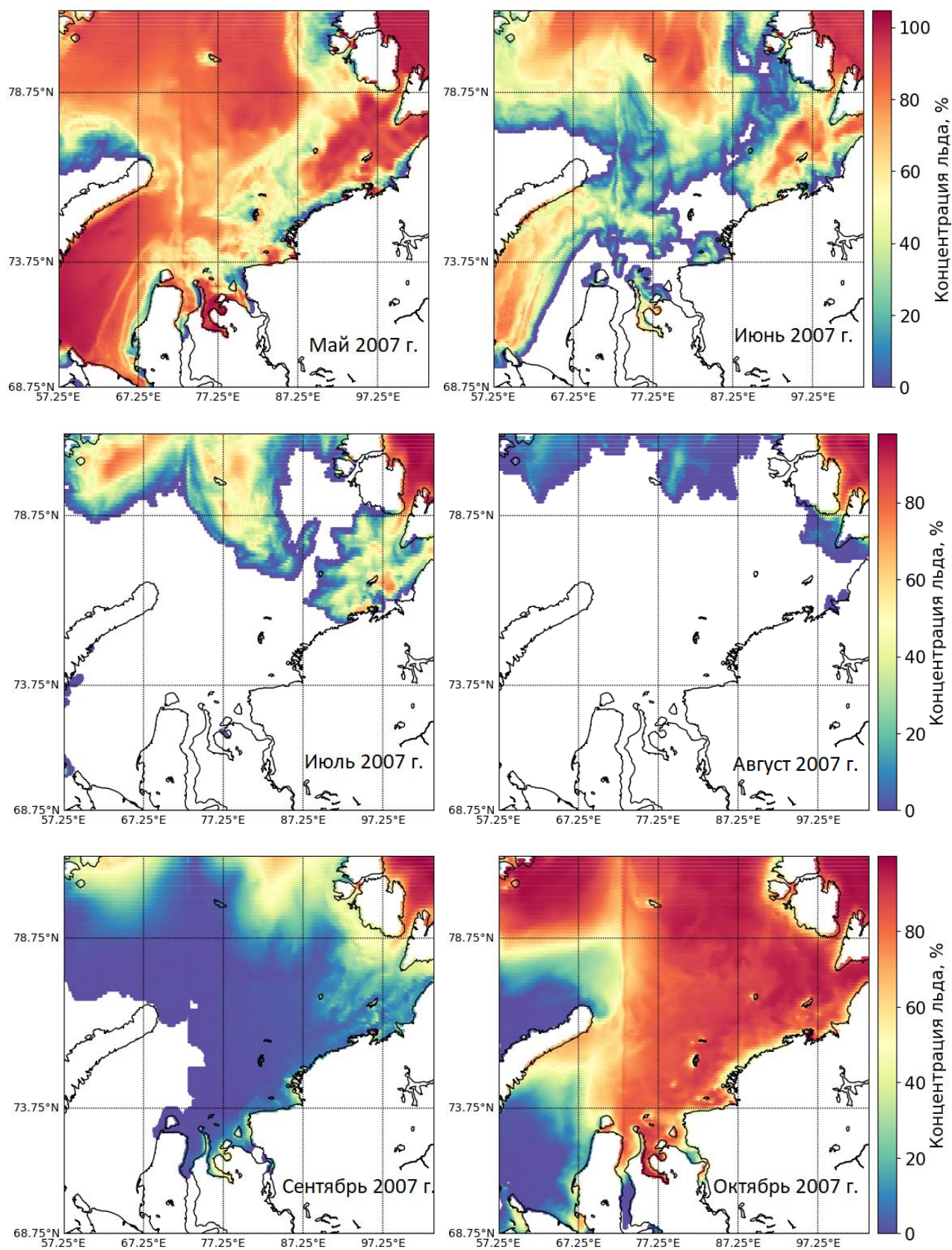


Рисунок 3.15 – Распределение концентрации льда в Карском море за май - октябрь 2007 года.

Чтобы отследить связь распределения класса «3» (ледового) и концентрации льда в Карском море за тот же период, обратимся к рисункам 3.15, построенным по информации того же массива данных GLORYS12V1. Как видно из рисунков 3.14 - 3.15, кластеризация очень хорошо выделила воды, образованные от талой воды (то есть класс «3»), подробно повторяя географическое положение кромки сплочённого льда. Так на рисунках распределения классов и концентрации льда на поверхности Карского моря (см. рисунки 3.14 и 3.15) хорошо видно, как с мая по июнь увеличивается площадь свободной от льда воды и, соответственно, увеличивается площадь ледового класса, что особенно заметно по июньской полынье, возникающей в затоке тёплой воды в северо-восточной части моря, к западу от островов Северная Земля, и по полынье, возникающей к северо-востоку от архипелага Новая Земля.

Хорошо видно, как полыньи с течением времени разрастаются, увеличивая площадь свободной от льда воды, и одновременно увеличивается площадь данного класса. Затем, при переходе к осеннему сезону года, акватория Карского моря начинает покрываться льдом, тем самым уменьшая площадь класса «3» (ледового), так как процесс таяния льда сменяется его образованием.

Для того, чтобы визуально проследить результаты пространственно-временной изменчивости классов не только на поверхности моря, но и в его толще до глубины 20 метров, изобразим пространственное трёхмерное распределение меток кластеров на примере мая - октября 2007 года (рисунок 3.16). Глядя на данный рисунок, можно сказать, что кластерный анализ позволяет разделить водную толщу на различные водные массы.

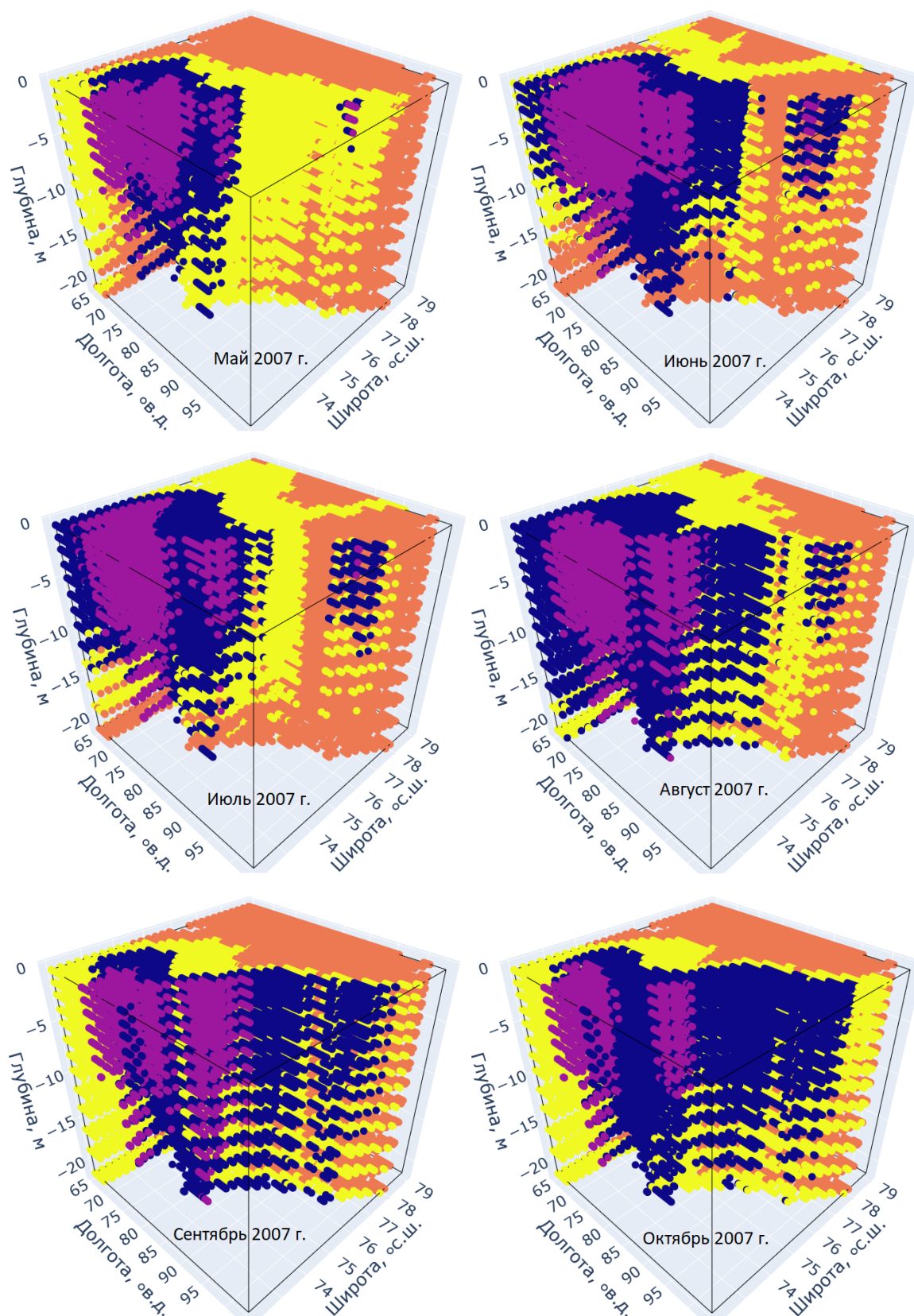


Рисунок 3.16 – Распределение меток кластеров в толще Карского моря за май – октябрь 2007 года. Распреснённый класс «0» обозначен синим цветом, пресный класс «1» – фиолетовым, ледовый класс «3» - жёлтым и морской класс «2» - оранжевым.

Хорошо видно, как происходят крупномасштабные процессы половодья и таяния льда в Карском море: в мае увеличивается интенсивность восточной, Енисейской, части стока «1» класса (пресного), так как волна половодья у реки Енисей раньше достигает акватории Карского моря [25]. Нижняя граница «1» (пресного) класса достигает в это время глубины около 10 метров и не достигает до дна, то есть под пресными водами находятся воды класса «2» (морского). Затем, в июне резко увеличивается интенсивность стока уже и реки Обь: западная, Обская, часть стока «1» (пресного) класса существенно увеличивает свою площадь на поверхности моря и проникает до глубины 15 метров в переходной зоне эстуарий - море. В июне - июле отчётливо проявляются ледовые полыньи, образованные талой водой на поверхности классом «3» (ледовым). Сток реки Енисей в июле становится менее интенсивным, что отображает уменьшение площади класса «0» (распреснённого) в восточной части приэстуарной зоны, а также его плавное растяжение на восток, тогда как площади классов «0» и «1» (распреснённого и пресного) Обской зоны всё ещё продолжают увеличиваться. Нижняя граница распреснённого слоя вблизи эстуариев может достигать 17 - 20 метров, а на удалении от них около 10 метров. В августе площадь обоих речных классов достигает максимальных размеров: Обский плюм распространяется к восточным берегам полуострова Ямал, а также к восточному побережью архипелага Новая Земля, тогда как Енисейский плюм уже прошёл узкой полосой вдоль побережья полуострова Таймыр половину пути до пролива Вилькицкого. В это время зафиксировано максимальное среднее значение нижней границы распреснённого слоя: почти на всей акватории оно меняется от 15 до 17 метров.

В сентябре - октябре заметно существенное уменьшение интенсивности стока обеих рек: площадь класса «1» (пресного) сокращается, тогда как площадь класса «0» на поверхности моря остаётся неизменной. Видно, что общий объём этого класса начал своё движение на восток к проливу Вилькицкого и класс «2» (морской) занимает своё исходное положение на 15 - 20 метрах глубины под распреснённым слоем.

В целом, глядя на данные карты распределения меток классов на поверхности Карского моря за май - октябрь 2007 года и сопоставляя их с картами распределения гидрологических характеристик за тот же временной промежуток, можно смело сказать, что кластеризация выполняется качественно, отделяя водные массы по их гидрометеорологическим признакам: солёности, температуре воды и концентрации силикатов в воде; все крупномасштабные гидродинамические и сезонные процессы в данном регионе проявляются адекватно.

3.3 Оценка объёмов воды каждого из классов

Программный комплекс позволяет найти процентное соотношение точек между каждым классом всего исследуемого периода времени для всего объёма:

- 14.7% для класса «0» (распреснённого);
- 5.3% для класса «1» (пресного);
- 60.1% для класса «2» (морского);
- 20% для «3» (ледового).

По расчётам этого исследования, общий объём исследуемого пространства воды должен составлять около 15 000 км³. От этих значений зависит пропорциональное распределение объёмов при расчёте. Данные значения демонстрируют то, что морской класс занимает доминирующее положение в изучаемой акватории, ледовый класс занимает значительное положение, а влияние речного стока на общий объём воды составляет всего около 20 %, что похоже на вышеописанное распределение водных масс в данном регионе. Графики рассчитанных объёмов воды для двух классов представлены на рисунках 3.17 - 3.18.

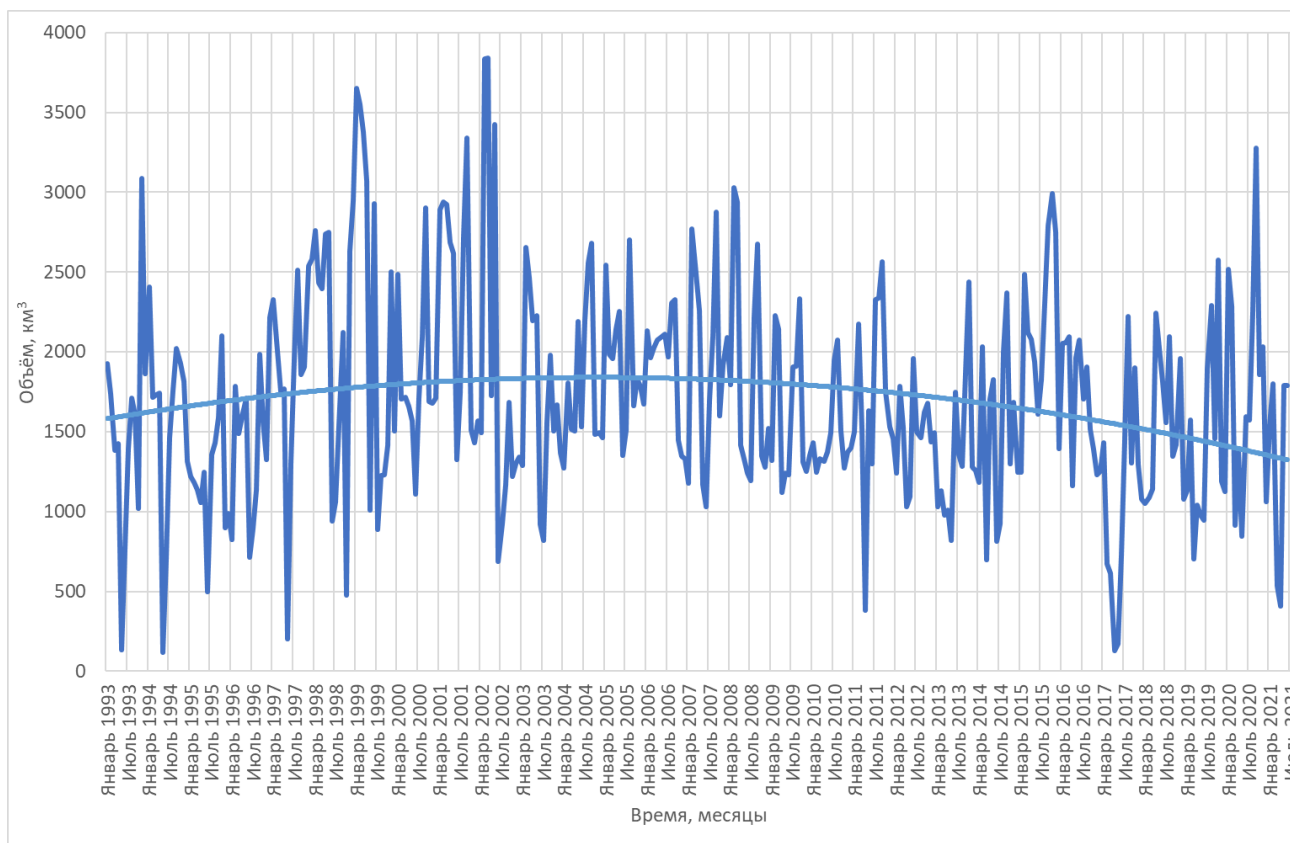


Рисунок 3.17 – Временная изменчивость объёма класса «0» (распреснённого) и его полиномиальный тренд.

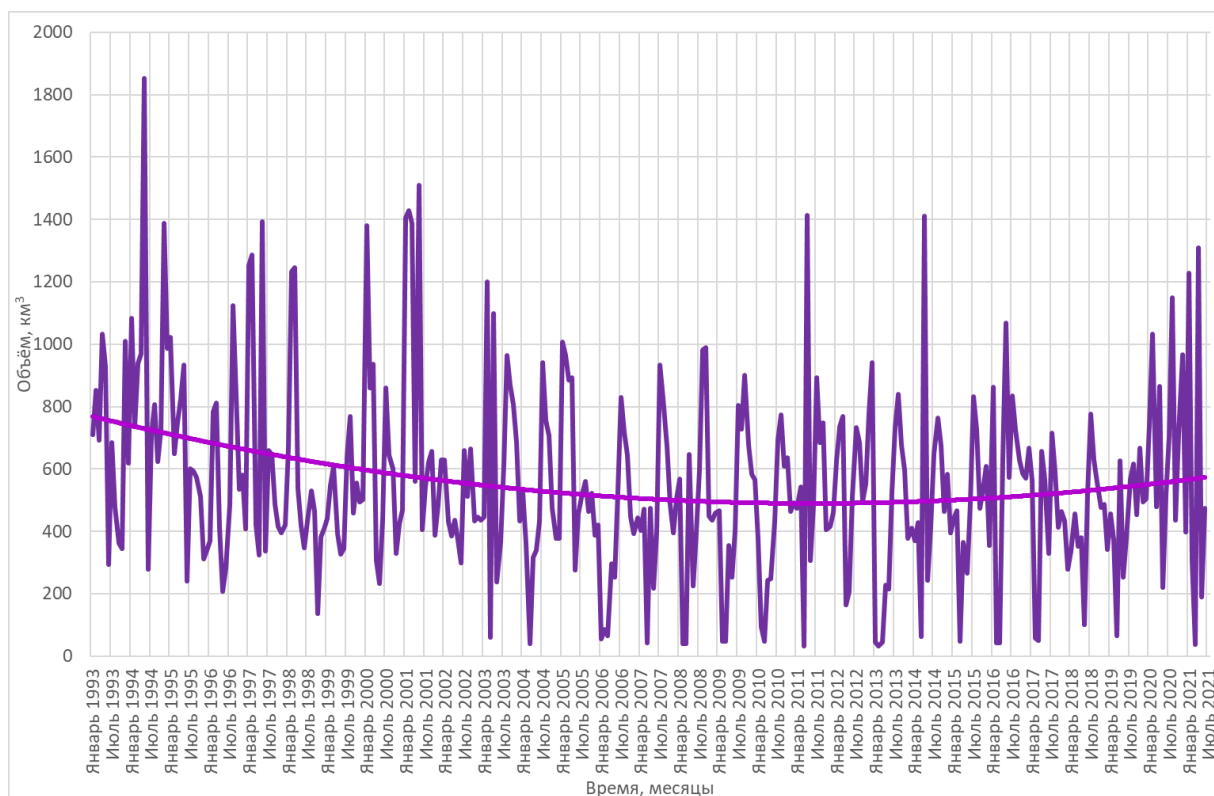


Рисунок 3.18 – Временная изменчивость объёма класса «1» (пресного) и его полиномиальный тренд.

Временная изменчивость объёма обоих классов демонстрируют характерное увеличение объёма в период весенне-летнего половодья и его уменьшение зимой. Объём класса «0» (распреснённого) может достигать 3 900 км³, а класса «1» (пресного) – 1 850 км³. Для каждого из объёмов были рассчитаны линейные и квадратичные тренды, но статистически значимыми оказались только квадратичные, поэтому для дальнейшего анализа будем рассматривать только их. Характеристики трендов представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Характеристики значимых трендов для объёмов класса «0» (распреснённого) и класса «1» (пресного)

Класс	Тренд	Коэффициент детерминации η^2
0	$V = -0.013t^2 + 3.68t + 1\,577.87$	0.043
1	$V = 0.0057t^2 - 2.54t + 770.97$	0.062

Особенностью полученных трендов является то, что для класса «0» (распреснённого) характерно снижение значений объёма примерно с половины исследуемого периода до настоящего времени, а для класса «1» (пресного) наблюдается обратная ситуация – постепенное возрастание значений объёма с 2010 года до 2021 года. Объяснением этому может быть более интенсивный сток рек в последнее десятилетие, но, судя по данному процессу, в таком случае должно быть и увеличение объёма распреснённого класса «0». Для дальнейшей работы в разделе 3.4 и наглядности, значения объёмов были осреднены до среднегодовых значений (рисунок 3.19). Направления изменения трендов значений среднегодовых значений объёмов совпадают с тенденциями изменения значений среднемесячных объёмов. Чтобы подробнее разобраться в причинах периодических изменений объёмов обоих классов, проведём для каждого ряда Вейвлет-анализ (рисунки 3.20 - 3.21).

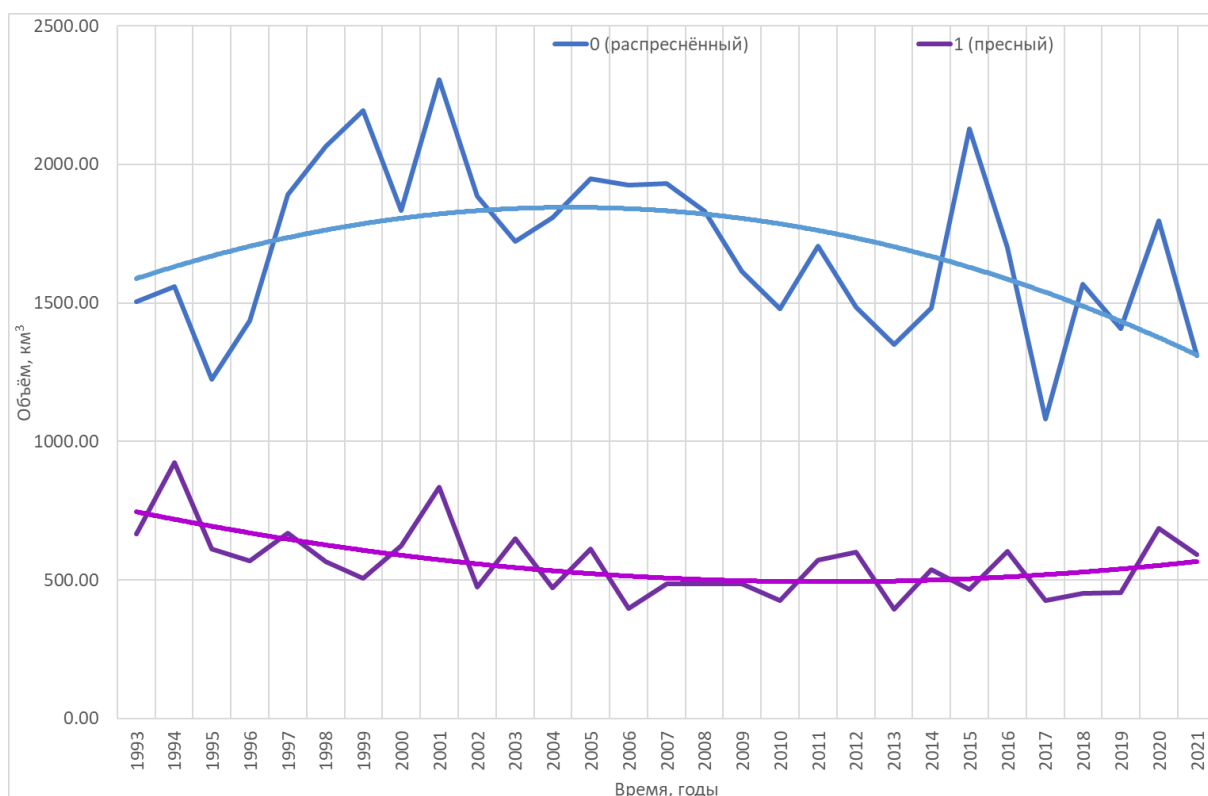


Рисунок 3.19 – Временная изменчивость среднегодовых значений объёмов распреснённого и пресного классов «0» и «1» и их полиномиальные тренды.

Вейвлет-анализ объёмов двух стоковых классов (рисунки 3.20 - 3.21) позволяет выделить колебания с периодом около года, соответствующие годовым изменениям стока рек в Карское море, что и вызывает данное стационарное изменение. Также отчётливо видны нестационарные процессы с периодом порядка 7.5 лет, что, скорее всего, связано с влиянием полюсного прилива или нутацией Земли, имеющие схожие периодические колебания. Такие процессы, возможно, способны отклонять или перемещать определённые части объёмов водных масс из исследуемого региона или в него, что сказывается на их общем объёме.

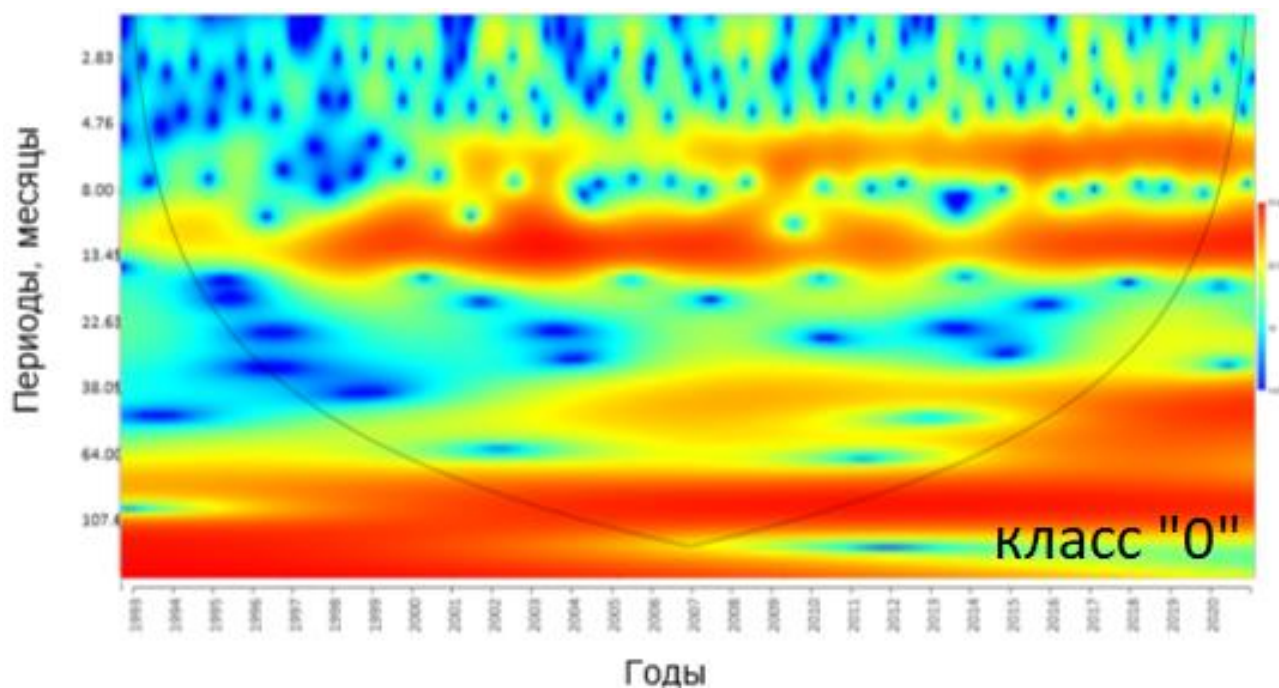


Рисунок 3.20 – Вейвлет-спектр временной изменчивости объёмов
распреснённого класса «0».

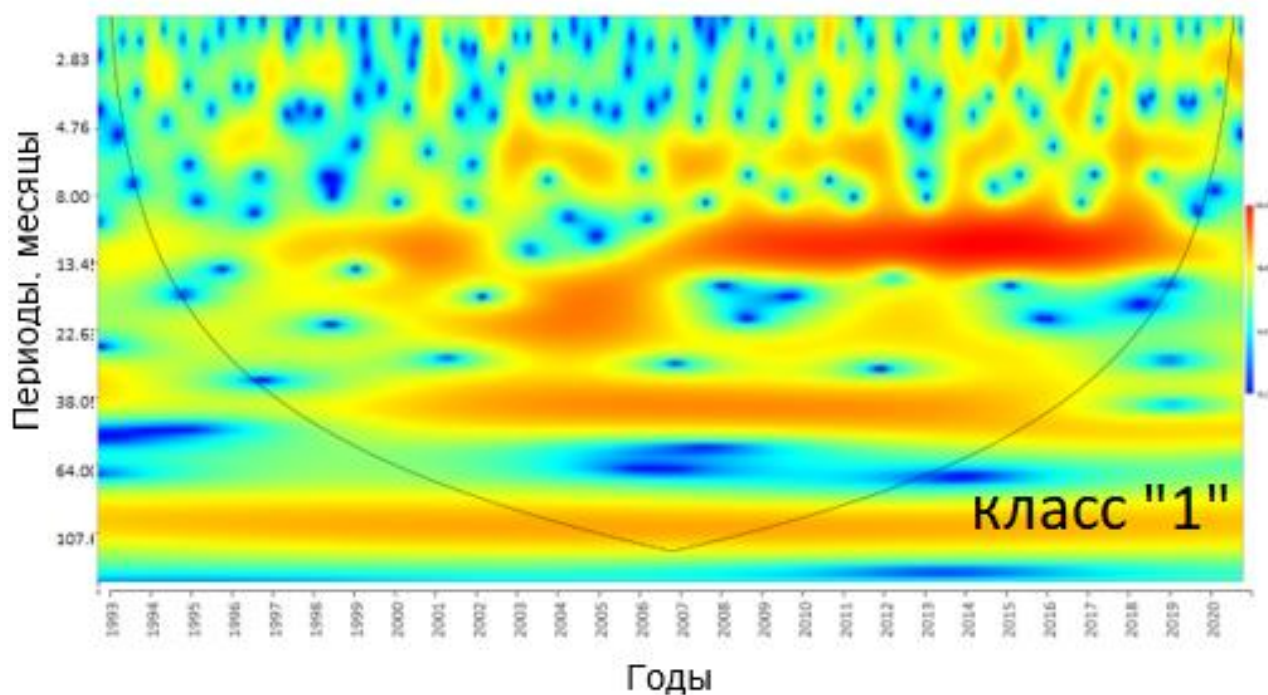


Рисунок 3.21 – Вейвлет-спектр временной изменчивости объёмов пресного
класса «1».

3.4 Оценка связей между объёмами и стоком рек

На основе проделанного статистического анализа объёмов обоих классов было решено выявить наличие или отсутствие связи между значениями объёмов и значениями стока рек Оби и Енисея. Значения расхода воды обеих рек были преобразованы из среднесуточных до среднегодовых и среднемноголетних значений. На основе этих данных проводился корреляционный анализ параметров.

Для начала проведём корреляцию между значениями осреднённого стока обеих рек за каждый год и суммой объёмов «0» (распреснённого) и «1» (пресного) классов (рисунок 3.22): коэффициент корреляции $R = 0.29$, что недостаточно для выявления однозначной связи между характеристиками, однако, глядя на рисунок, можно сказать, что значения характеристики часто изменяются в одном направлении и показывают физичный отклик реальной гидродинамической системы распространения стока из эстуария в море. Так, в 2012 году заметно резкое снижение значений среднего стока рек, а в 2013 году резкое уменьшение значение объёма обоих классов. Похожая ситуация происходит в 2016 - 2017 годах, но, можно наблюдать и обратную зависимость: в 2002 году наблюдается резкий спад значений объёмов, а в 2013 – резкий спад значений стока обеих рек. Данная ситуация не может быть реальной: значения накопленного объёма, образованного от стока рек, не могут предшествовать процессу самого стока. Если при расчёте корреляции произвести сдвиг ряда в любую сторону на год или два, коэффициент корреляции лишь уменьшается, что говорит о точном отсутствии связи характеристик с годовым интервалом.

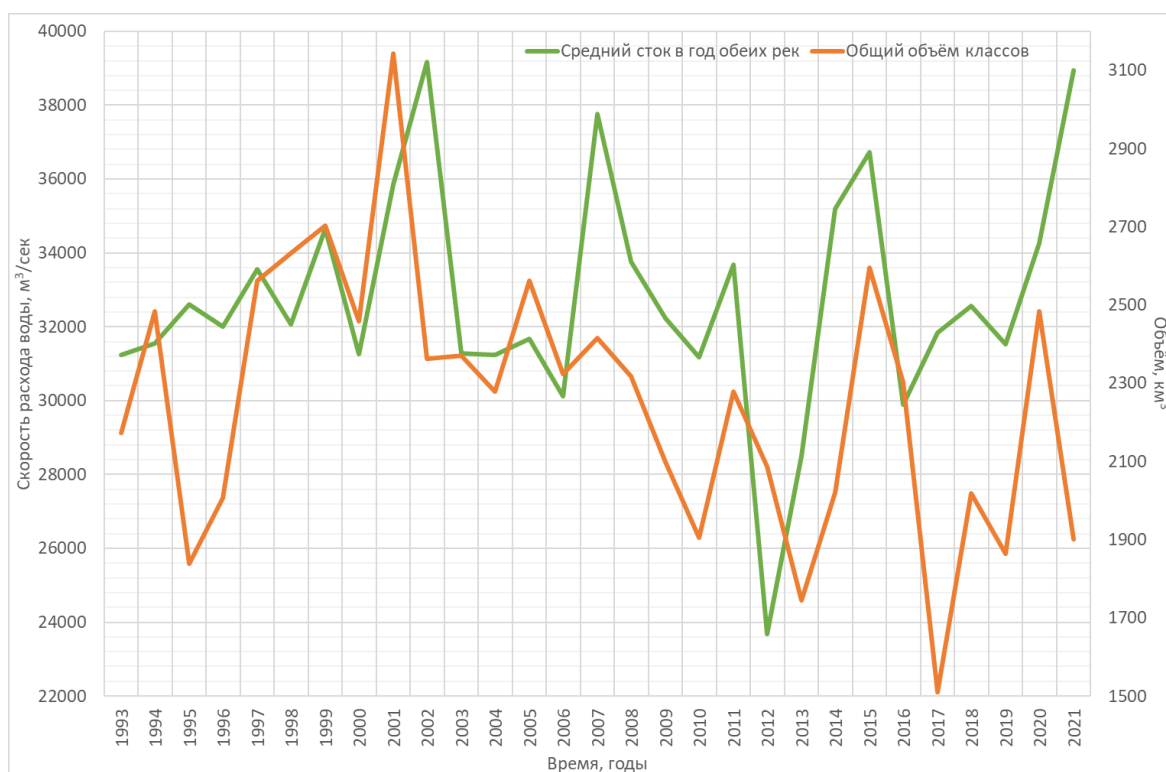


Рисунок 3.22 – Временная изменчивость среднегодовых значений объёма обоих классов и значений расхода воды обеих рек вместе.

Корреляция между значениями среднегодового стока обеих рек с каждым из среднегодовых значений объёмов классов создаёт противоречивые результаты (рисунки 3.23 - 3.24): с «1» (пресным) классом при сдвиге в 2 месяца коэффициент корреляции $R = 0.78$, с «0» (распреснённым) классом при сдвиге в 3 месяца $R = 0.89$, а с «3» (ледовым) классом при сдвиге 2 месяца $R = 0.79$. Без сдвигов связи между параметрами не наблюдается. Такие коэффициенты корреляции указывают на наличие связи между расходом стока рек и объёмов классов с различными сдвигами, но графики на рисунках показывают парадоксальную ситуацию: при максимальном среднегодовом значении стока рек с растянутым пиком с июня по август, среднегодовое значение объёмов для речных классов минимальное. Только после прохождения 2 месяцев для «1» пресного класса и 3 месяцев для «0» распреснённого класса среднегодовые значения объёмов классов становятся максимальными в августе - сентябре соответственно.

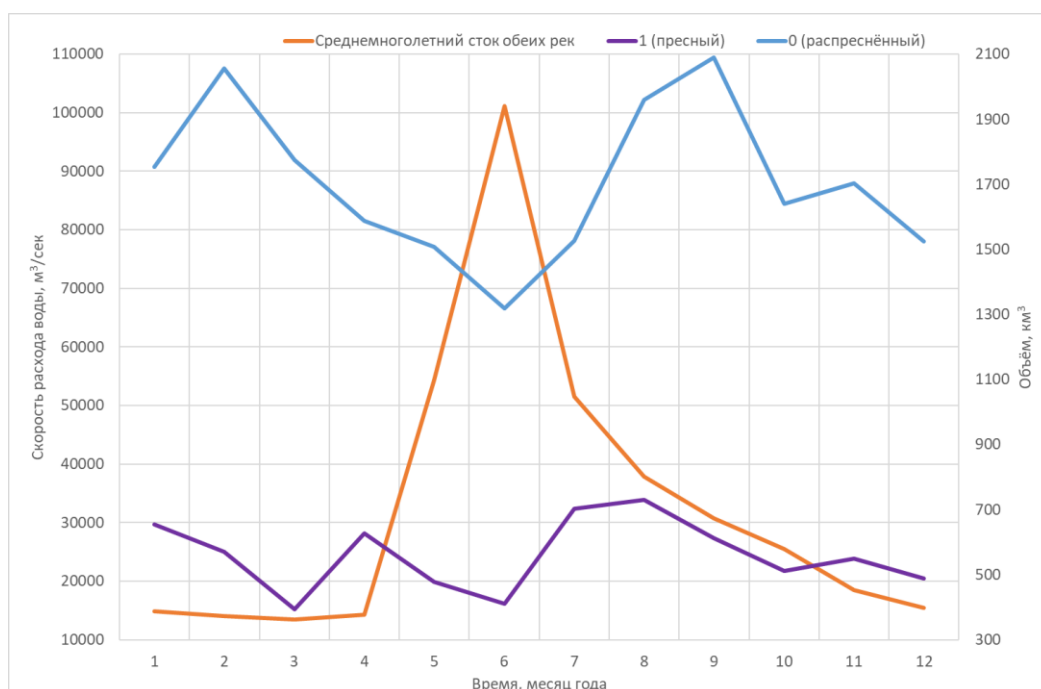


Рисунок 3.23 – Временная изменчивость среднегодовых значений объёма «0» и «1» (распреснённого и пресного) классов и значений расхода воды обеих рек вместе.

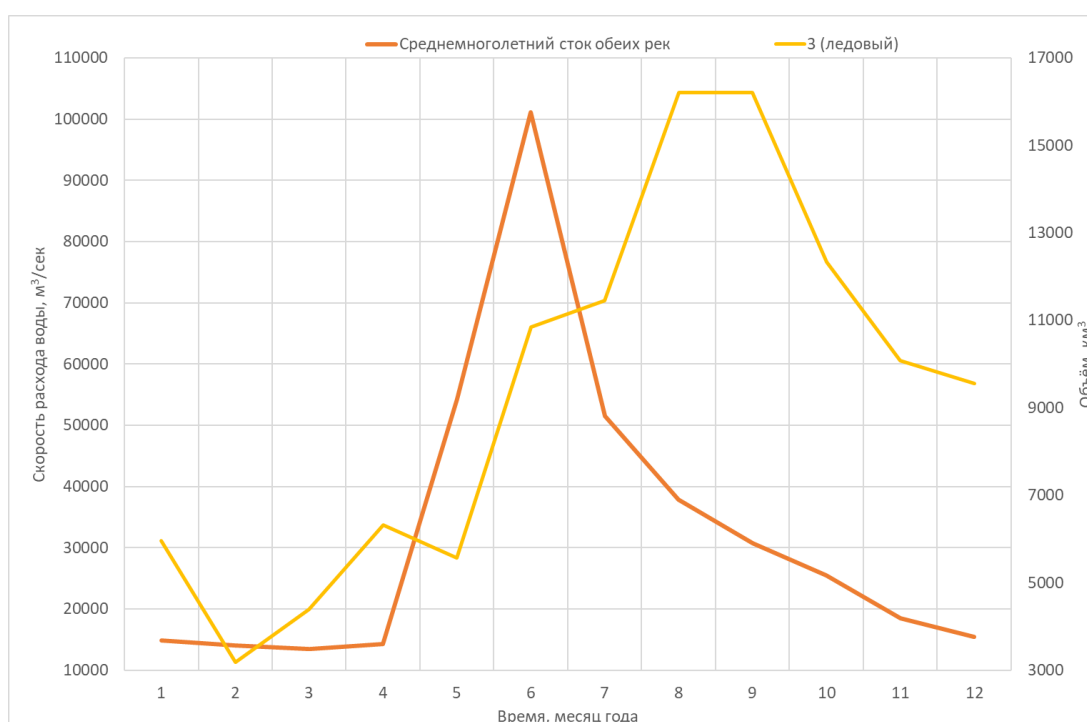


Рисунок 3.24 – Временная изменчивость среднегодовых значений объёма «3» (ледового) класса и значений расхода воды обеих рек вместе.

Для среднемноголетних значений объёма «3» (ледового) класса ситуация иная: минимум данного объёма приходится на февраль и постепенно возрастает до максимума в августе - сентябре, что может быть оправдано почти полным таянием возможного льда в Карском море, но то, что данный объём класса имеет коэффициент корреляции $R = 0.79$ с значениями среднемноголетнего расхода воды Оби и Енисея можно объяснить тем, что классификационный алгоритм определяет значительные объёмы воды, подверженные речному распреснению, к ледовому классу, а также тем, что, скорее всего, речной сток имеет ещё большее влияние на акваторию Карского моря и имеет влияние на большие классы, чем на «0» и «1» (распреснённый и пресный). На данный результат могут влиять и другие крупномасштабные процессы, способствующие вытеснению распреснённого объёма из моря.

Полученные результаты демонстрируют то, что, скорее всего, классификация таких объёмов данных содержит в себе некоторые недостатки, которые проявляются в виде различных проявлениях связей между значениями объёмов разделённых классов и значениями стока рек Оби и Енисея. Сама по себе классификация с 342 итерациями по времени перемещает центроиды в пространстве в зависимости от свойств водной массы, что меняет и характеристики общей кластеризации. Даная процедура сможет быть проделана без недостатков только при развитии мощностей компьютеров, способных для кластеризации всего массива данных в виде одномерной матрицы (в одну итерацию), не меняя начальное положение центроидов схожих по свойству водных масс. На качестве полученных значений могут сказаться и недостатки работы реанализа в Арктическом регионе, а также плохое качество реанализа у береговой зоны, возле которой и проводилась основная часть расчётов данного исследования.

Заключение

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

1. По данным реанализа GLORYS12V1 были построены карты распределения солёности, температуры воды и концентрации силикатов в воде на поверхности Карского моря, а также пять зональных разрезов солёности для 20 метров толщи Карского моря. Отмечено, что по этим признакам можно определить направления движения распреснённой воды в Карском море: в мае - июне преобладает распреснённый поток из Енисейского залива,двигающийся на восток вдоль побережья полуострова Таймыр, затем в июне - июле волна половодья из реки Обь заполняет большие пространства моря к западу от полуострова Ямал и достигает побережья архипелага Новая Земля, после чего вся распреснённая водная масса смешивается и двигается к проливу Вилькицкого.

2. В ходе проведения кластеризации выделены климатические изменения центроидов каждого из признаков. Отмечено изменение положения точек центроидов на T-S-Si-диаграмме: происходит их смещение в правую область диаграммы, в сторону возрастания значений температуры и, в меньшей степени, вверх, в сторону возрастания значений концентрации силикатов, а затем, в сентябре - октябре происходит их возврат на исходные позиции.

Выделены значимые тренды изменения характеристик каждого из классов «0», «1» и «3» (распреснённого, пресного и ледового). Во временной изменчивости солёности и температуры «0» и «1» классов преобладает периодическое годовое колебание за весь период исследования. Для колебаний характеристики центроидов концентрации силикатов для ледового класса «3» чётко видна годовая изменчивость характеристики.

3. В ходе представления результатов пространственно-временной изменчивости классов на поверхности моря и в его толще до глубины 20 метров

выявлено, что кластерный анализ позволяет разделить водную толщу на различные водные массы. Хорошо видно, как происходят крупномасштабные процессы половодья и таяния льда в Карском море: в мае увеличивается интенсивность восточной «Енисейской» части стока «1» класса, его нижняя граница достигает в это время около 10 метров глубины. Затем западная «Обская» часть стока «1» класса увеличивает свою площадь на поверхности моря и проникает до глубины 15 метров. В июне - июле проясняются ледовые полыньи, образованные талой водой на поверхности «3» классом. Сток реки Енисей в июле становится менее интенсивным, а также происходит его плавное растяжение на восток, тогда как площади классов «0» и «1» Обской зоны всё ещё продолжают увеличиваться. Нижняя граница распреснённого слоя вблизи эстуариев может достигать 17 - 20 метров, а на удалении от них около 10 метров. В августе площадь обоих речных классов достигает максимальных размеров. В это время зафиксировано максимальное среднее значение нижней границы распреснённого слоя: почти на всей акватории оно меняется от 15 до 17 метров. В сентябре - октябре заметно существенное уменьшение интенсивности стока рек, и общий объём этого классов начал своё движение на восток к проливу Вилькицкого.

4. В ходе вычисления объёмов, занимаемых каждым классом, отмечено, что увеличение объёма происходит в период весенне-летнего половодья, а его уменьшение – зимой. Объём распреснённого класса «0» может достигать 3 900 км³, а пресного класса «1» – 1 850 км³. Значимыми трендами для объёмов оказались только квадратичные: для класса «0» характерно снижение значений объёма примерно с половины исследуемого периода до настоящего времени, а для класса «1» наблюдается постепенное возрастание значений объёма с 2010 года до 2021 года. Вейвлет-анализ объёмов двух стоковых классов позволил выделить колебания с периодом около год порядка 7.5 лет.

5. В ходе поиска связей между значениями объёмов классов и значениями стока рек Оби и Енисея выявлены неоднозначные результаты.

Список использованной литературы

- 1 Географический справочник «Россия – Родина моя». [Электронный ресурс] URL: <http://russia.1pku.ru/index.php/nature/morya-i-okeyany/morya/55-karskoe-more/7-karskoe-more> (дата обращения 30.03.2024);
- 2 Osadchiev A.A., Frey D.I., Shchuka S.A., Tilinina N.D., Morozov E.G., Zavialiv P.O. Structure of the Freshened Surface Layer in the Kara Sea During Ice-Free Periods // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2021. № JC016486. С. 1 – 25. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JC016486>;
- 3 Фарбридж У. Океанографическая энциклопедия / Ленинград: Гидрометеиздат. 1974. 631 с.;
- 4 Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V. A Reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // American Journal of Science. Vol. 296, June, 1996, P. 664-691. JRC14340;
- 5 Osadchiev A.A., Asadulin En.E., Moroshnikov A.Yu., Zavialov I.B., Dubinina E.O., Belyakova P.A. Bottom Sediments Reveal Inter-Annual Variability of Interaction between the Ob and Yenisei Plumes in the Kara Sea // Nature research: Scientific Reports. 2019. № 9:18642. С. 1-11. DOI: 10.1038/s41598-019-55242-3;
- 6 Деев М.Г., Карское море. Большая российская энциклопедия. [Электронный ресурс] URL: <https://old.bigenc.ru/geography/text/2049073> (дата обращения – 07.03.2024);
- 7 Мокиевский В.О., Цетлин А.Б., Сергиенко Л.А., Евсеев А.В., Гаврило М.В., Деев М.Г., Ермолов А.А., Илюшин Д.Г., Исаченко А.И., Глазов Д.М., Ефимов Я.О., Загретдинова Д.Р., Корнишин К.А., Кочи К.В., Максимова О.В., Полухин А.А., Удовик Д.А. Экологический атлас. Карское море / ООО «Арктический Научный Центр». Москва. 2016. 272 с.;
- 8 Carmack E., Polyakov I., Padman L., Fer I., Hunke E., Hutchings J., Jackson J., Kelley D., Kwok R., Layton C., Melling H., Perovich D., Persson O., Ruddick B., Timmermans M.-L., Toole J., Ross T., Vavrus S., Winsor P. Toward Quantifying the Increasing Role of Oceanic Heat in Sea Ice Loss in the New Arctic // Bulletin of the

American Meteorological Society. 2015. Vol. 96: P. 2079-2105. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00177.1;

9 Brown N.J., Nilsson J., Pemberton P. Arctic Ocean freshwater dynamics: Transport Response to Increasing River Runoff and Precipitation // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. № JC014923. C. 5205-5219. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JC014923>;

10 Osadchiev A.A., Pisareva M.N., Spivak E.A., Shchuka S.A., Semiletov I.P. Freshwater transport between the Kara, Laptev and East-Siberian seas // Nature Research: Scientific Reports. 2020. № 10:13041. C. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70096-w>;

11 Pavlov V.K., Pfirman S. L. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // Deep-Sea Research Part (II). 1995. Vol. 42. №6: P. 1369-1390. DOI: [https://doi.org/10.1016/0967-0645\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0967-0645(95)00046-1);

12 Proshutinsky A., Krishfield R., Toole J. M., Timmermans M.-L., Williams W., Zimmermann S., Yamamoto-Kawai M., Armitage T. W. K., Dukhovskoy D., Golubeva E., Manucharyan G. E., Platov G., Watanabe E., Kikuchi T., Nishino S., Itoh M., Kang S.-H., Cho K.-H., Tateyama K., Zhao J. Analysis of the Beaufort Gyre Freshwater Content in 2003-2018 // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. № JC015281. C. 9659-9689. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JC015281>;

13 Morison J., Kwok R., Peralta-Ferriz C., Alkire M., Rigor I., Andersen R., Steele M. Changing Arctic Ocean freshwater pathways // Nature. 2012. № 481. C. 66-70. DOI:10.1038/nature10705;

14 Polyakov I.V., Alexeev V.A., Belchinsky G.I., Dmitrenko I.A., Ivanov V.V., Kirillov S.A., Korablev A.A., Steele M., Timokhov L.A., Yashayaev I. Arctic Ocean Freshwater Changes Over the Past 100 Years and Their Causes // Journal of climate. 2008. № 21. C. 364-384. DOI: 10.1175/2007JCLI1748.1;

15 Johnson H.L., Cornish S.B., Kostov Y., Beer E., Lique C. Arctic Ocean Freshwater Content and Its Decadal Memory of Sea-Level Pressure // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2018. № GL076870. C. 4991-5001. DOI: <https://doi.org/10.1029/2017GL076870>;

16 Pivovarov S., Schlitzer R., Novikhin A. River Run-Off Influence on the Water Mass Formation in the Kara Sea // Elsevier. 2003. С. 9-26. DOI: 10.1016/S1568-2692(03)80028-1;

17 Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР // Издательство Московского университета. 1982. 192 с.;

18 Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана / Ленинград Гидрометеиздат. 1980. 267 с.;

19 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;

20 Osadchiev A.A., Izhitskiy A.S., Zavialov P.O., Kremenetskiy V.V., Polukhin A.A., Pelevin V.V., Z.M. Toktamysova Structure of the buoyant plume formed by Ob and Yenisei river discharge in the southern part of the Kara Sea during summer and autumn // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2016. № JC012693. С. 1-20. DOI. doi:10.1002/2016JC012603;

21 Осадчиев А.А. Речные плюмы / Москва. Научный мир. 2021. 288 с.;

22 Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Поярков С.Г., Соловьев Д.М. Поверхностный опреснённый слой в Карском море // Океанология. 2010. Т.50. №5. С. 698-708;

23 Полухин А.А. Формирование гидрохимической структуры поверхностных вод Карского моря под влиянием континентального стока: Дисс. канд. геогр. наук: 25.00.28. Москва. 2017. 149 с.;

24 Антонов В.С. Распределение речных вод в Арктических морях // Труды Арктического научно-исследовательского института. 1957. Т. 208. С. 25-52.;

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

26 Osadchiev A.A., Shchuka S., Spivak E., Pisareva M., Semiletov I. Influence of Estuarine Tidal Mixing on Structure and Spatial Scales of Large River Plumes //

Ocean Science Discussion. 2019. № 119. С. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.5194/os-2019-119>;

27 Osadchiev A., Sedakov R., Frey D., Gordey A., Rogozhin V., Zabudkina Z., Spivak E., Kuskova E., Sazhin A., Semiletov I. Intense Zonal Freshwater Transport in the Eurasian Arctic During Ice-Covered Season Revealed by in Situ Measurements // Scientific Reports. 2023. № 13:16508. С. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43524-w>;

28 Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Поярков С.Г., Соловьев Д.М. Поверхностный опреснённый слой в Карском море // Океанология. Физика моря. 2010. Том 50, № 5. с. 698-708;

29 Elkin D.N., Kremenetskiy V.V., Zatsepin A.G. Laboratory Study of Horizontal Mixing Process between Two River // ELSEVIER. SciVerse ScienceDirect. 2013. № 8. p. 103-110. DOI: 10.1016/j.piutam.2013.04.014;

30 Zhurbas, N.V., Zavialov P.O. Effect of Stratification on Wind Drift of River Runoff in the Kara Sea // Oceanology. Marine Physics. 2015. Vol. 55, № 6, pp. 827-83. DOI: 10.1134/S00014370150602231;

31 Zatsepin A.G., Zavialova P.O., Baranov V.I., Kremenetskiya V.V., Nedospasova A.A., Poyarkova S.G., Ocherednik V.V. On the Mechanism of Wind-Induced Transformation of a River Runoff Water Lens in the Kara Sea // Oceanology. Marine Physics. 2017. Vol. 57, № 1, pp. 1-7. DOI: 10.1134/S0001437017010222;

32 Frey D.I., Osadchiev A.A. Large River Plumes Detection by Satellite Altimetry: Case Study of the Ob–Yenisei Plume // MDPI. Remote sensing. 2021. Vol. 13, № 5014, pp. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs1324501>;

33 Kubryakov A., Stanichny S., Zatsepin A. River plume dynamics in the Kara Sea from altimetry-based lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data // ELSEVIER. Remote Sensing of Environment. 2016. № 176. pp. 177-187. DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.020;

34 Osadchiev A.A., Kuskova E., Ivanov V. The roles of river discharge and sea ice melting in formation of freshened surface layers in the Kara, Laptev, and East

Siberian seas // *Frontiers. Frontiers in Marine Science*. 2024. Mar. Sci. 11:1348450. pp. 1-16. DOI 10.3389/fmars.2024.1348450;

35 Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Педченко А.П. Оценка изменчивости характеристик Стоковой фронтальной зоны Карского моря на основе комплексирования данных спутникового дистанционного зондирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 2. С. 241-250. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-241-250;

36 Вайновский П.А., Малинин В.Н., Методы обработки и анализа океанологической информации. Многомерный анализ. РГГМИ. 1992. 96 с.;

37 Брюс П., Брюс Э., Гедек П. Практическая статистика для специалистов Data Science. БХВ-Петербург. 2023. 352 с.;

38 Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». РГГМУ. 2017. 67 с.;

39 Osadchiev A.A. Spreading and Transformation of River Discharge in the Arctic Ocean // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2021. Vol. 91, No. 6. pp. 694–699. DOI: 10.1134/S1019331621060101;

40 Карклин В.П., Юлин А.В., Шаратунова М.В., Мочнова Л.П. Климатическая изменчивость ледяных массивов Карского моря // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017. № 4 (114). с. 37-49.