



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

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему Исследование водных масс в Горле Белого моря

Исполнитель Иванова Вироника Андреевна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук  
(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)

« 19 » июль 2023 г.

Санкт-Петербург  
2023

## Оглавление

Введение .....	4
1 Физико-географическое описание Горла Белого моря .....	7
1.1 Белое море .....	7
1.1.1 Классификация акватории Белого моря .....	7
1.1.2 Батиметрия.....	10
1.2 Горло Белого моря .....	11
1.2.1 Течения .....	11
1.2.2 Приливы.....	13
1.2.3 Водные массы.....	15
1.2.4 Ветер и волнение.....	18
1.2.5 Распределение температуры воды .....	19
1.2.6 Распределение солености воды .....	19
1.2.7 Лед .....	20
2 Материалы и методы .....	21
2.1 Исходные данные.....	21
2.2 Методы исследования .....	22
2.2.1 Кластерный анализ .....	22
2.2.2 Статистические методы оценивания .....	24
3 Среднее многолетнее состояние гидрологических характеристик в Горле Белого моря.....	26
4 Кластерный анализ водных масс в Горле Белого моря.....	30
4.1 Распределение водных масс в пространстве в разные климатические периоды .....	30

4.2 Изменение характеристик водных масс в разные климатические периоды .....	37
4.2.1 Изменение средних характеристик .....	37
4.2.2 TS-диаграммы.....	39
4.2.3 TV-диаграммы .....	42
4.2.4 Сравнение средних показателей по критерию Стьюдента .....	44
Заключение .....	48
Список использованных источников.....	50

## Введение

Водные массы это определенный объем воды, который имеет свои гидрохимические показатели. Формирование водных масс происходит в конкретных областях Мирового океана.

Выделение и изучение водных масс нужно для, более полного понятия того, как изменяются воды конкретного водоема или области в разные климатические периоды, т. к. характеристики водных масс постоянно подвергаются изменениям. Также изучение водных масс, помогает в исследовании динамических процессов морей и океанов, а также взаимодействие океана с атмосферой.

Данная работа выполнялась для исследования водных масс Горла Белого моря, за различные периоды и в различное время года. Для того, чтобы оценить, насколько изменятся характеристики водных масс спустя 20 лет, а также выявить насколько изменяются водные массы в разные климатические периоды.

Из источников литературы выявлено, что в целом Белое море изучено не полностью, соответственно Горло Белого моря и его водные массы изучены также. «Несмотря на то, что основной объем проводимых исследований Белого моря посвящен экспериментальным, экспедиционным исследованиям. До сих пор недостаточно изучены процессы переноса и трансформации вещества в море, водообмен, в особенности через Горло, между Белым и Баренцевым морями, влияние изменений климата и антропогенных факторов на экосистему моря» [1].

Цель данной работы – исследовать водные массы Горла Белого моря, выявить изменения их характеристик в разные климатические периоды.

Задачи работы заключаются в следующем:

1. Выполнить физико-географическое описание Горла Белого моря.

2. Описать среднее многолетнее состояние гидрологических характеристик в Горле Белого моря.
3. Выделить водные массы с помощью кластерного анализа в Горле Белого моря в разные климатические периоды. Описать, как изменяются характеристики водных масс в разные климатические периоды.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

Структура данной работы:

В 1 главе, изложено физико-географическое описание Горла Белого моря, описана его классификация. Подробно рассмотрены динамические процессы, происходящие в Белом море, а также гидрохимические характеристики их изменения и распределения на поверхности моря и на глубинах.

Во 2 главе описаны исходные данные и методы, с помощью которых выполнялась данная работа. Были использованы следующие методы: кластерный анализ (метод k-средних), статистическая проверка гипотез (проверка гипотезы о равенстве средних значений характеристик).

В 3 главе описаны изменения среднего многолетнего состояния гидрологических характеристик в исследуемой области.

В 4 главе выполнен расчет кластерного анализа, также выполнены анализы о том, как изменяются водные массы в пространстве и как изменяются характеристики водных масс в разные промежутки времени. Описаны изменения средних показателей характеристик, а также изменения, которые выявлены на TS-диаграммах и TV-диаграммах в разные климатические периоды.

Исследование публиковалось в рамках Студенческой научной конференции РГГМУ (СНО РГГМУ, 2022 год) в виде стендового доклада на тему: Климатическая изменчивость гидрологических характеристик в Горле Белого моря. Цель работы – выявить насколько изменилась структура вод,

проходящих транзитом через Горло Белого моря, в течение последнего климатического периода. В работе были представлены средние за пятилетия (1993-1997 и 2015-2019 гг.) значения температуры воды ( $^{\circ}\text{C}$ ) и солености ( $\text{‰}$ ), и разности между периодами времени в феврале и в августе.

## 1 Физико-географическое описание Горла Белого моря

### 1.1 Белое море

Белое море расположено на северо-западе России, глубоко врзается в сушу и полностью находится в пределах страны. Относится к морям Северного Ледовитого океана, акватория моря занимает пространство между  $68^{\circ}40'$  и  $63^{\circ}48'$  с. ш., и  $32^{\circ}00'$  и  $44^{\circ}30'$  в. д. Является внутренним морем, длина его береговой линии равна 5 100 км. На севере море граничит с Баренцевым морем, границей является условная линия, проходящая от мыса Святой Нос ( $68^{\circ}09'$  с. ш.), который расположен на Кольском полуострове до мыса Канин Нос ( $68^{\circ}40'$  с. ш.), который расположен на полуострове Канин. По сравнению с морями России, море считается не большим, его площадь составляет 90 000 км<sup>2</sup>, объём – 6 000 км<sup>3</sup>. Средняя глубина 60 м, наибольшая глубина достигается в северо-восточной части Кандалакшского залива и составляет 340 м [1, 2, 3].

#### 1.1.1 Классификация акватории Белого моря

Белое море разделяется на следующие основные районы: Бассейн, Горло, Воронка и заливы. Так как береговая черта моря сильно изрезана, в нем образуются множество заливов, из них выделяют 4 основных, это Кандалакшский, Мезенская губа, Двинская губа и Онежская губа. На рисунке 1, изображена карта Белого моря, на которой представлены выше причисленные районы моря.

В Белом море выделяют следующие берега Терский, Кандалакшский, Карельский, Поморский, Онежский, Летний, Зимний, Мезенский и Канинский берега, но иногда Мезенский разделяют на Абрамовский и Конушинский, а часть Онежского называют Лямецким берегом [2]. Берега перечислены в

порядке против часовой стрелки от побережья Кольского полуострова, также представлены на рисунке 1.

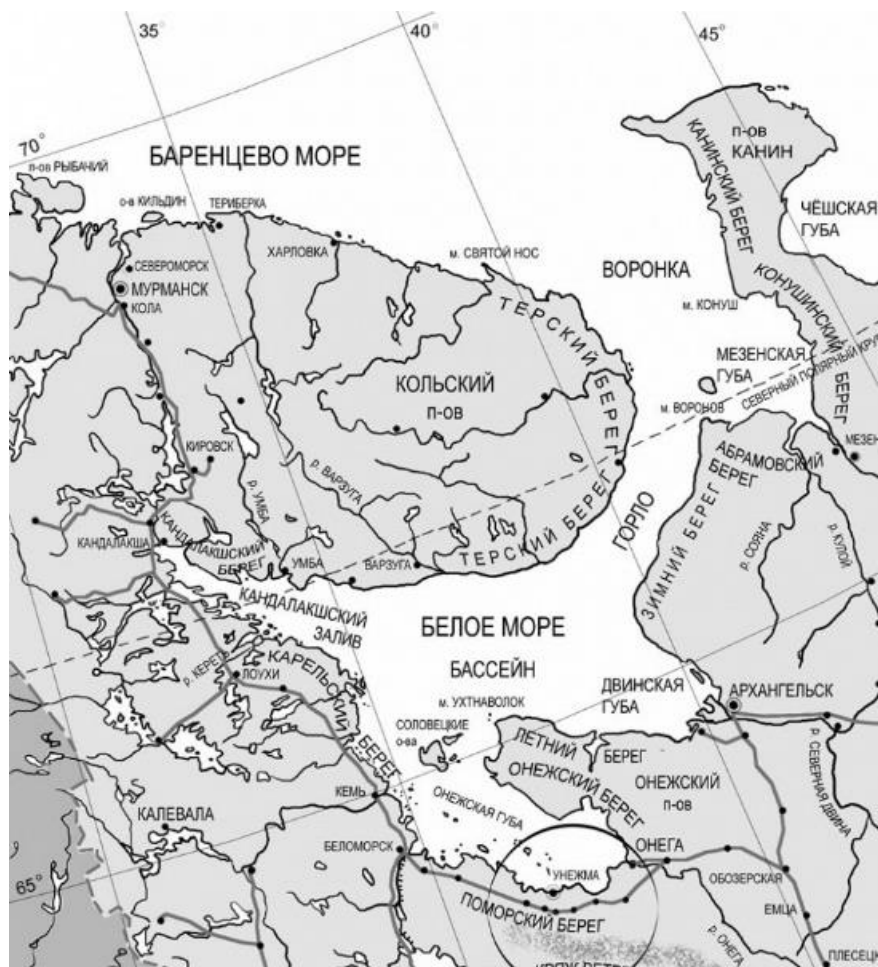


Рисунок 1 – Берега и основные части Белого моря [4]

Центральная часть моря называется Бассейн, она является наиболее обширной и глубоководной, граничит с Кандалакшским заливом, Двинской и Онежской губой. Самым глубоким заливом в Белом море, является Кандалакшский, его берега сильно изрезаны, имеет большое количество островов, которые объединены в архипелаги. В южной части Белого моря расположены Двинская и Онежская губы. Двинская губа заключена между Летним и Зимним берегом, в него впадает крупнейшая река Бассейна Белого моря – Северная Двина. Онежская губа является самой мелководной, ее средняя



глубина около 20 м, граница губы условно проходит через Соловецкий архипелаг [1, 5].

В северной части моря, где Белое море соединяется с Баренцевым, выделяется район Воронка, он является самым крупным. Северная граница района проходит от мыса Святой Нос, который расположен на Кольском полуострове до мыса Канин Нос, который расположен на полуострове Канин. На юге Воронку ограничивают с одной стороны устье реки Поной и мыс Воронов, а с другой - м. Воронов и м. Конушин. Мезенская губа ограничиваются Абрамовским и Конушинским берегами, а ее граница проходит по острову Моржовец [1, 5].

Горло Белого моря — это пролив соединяющий Бассейн Белого моря с Воронкой и отделяющий Терский берег от Зимнего. Ширина пролива составляет 45-55 км, длина 170 км. Граница Горла на северо-востоке – линия, соединяющая устье реки Поной и мыс Воронов, а на юго-западе – линия соединяющая мыс Никодимский и мыс Вепревский [1, 5].

Ниже в таблице 1, представлены морфометрические характеристики основных районов Белого моря.

Таблица 1 – Морфометрические характеристики Белого моря [1]

Районы	Площадь, км <sup>2</sup>	Объем, км <sup>3</sup>	Средняя глубина, м
Воронка	24 600	855	34
Горло	10 200	380	37
Бассейн	21 800	2 725	125
Мезенский залив	5 600	75	13
Кандалакшский залив	6 500	710	109
Онежский залив	12 300	235	19
Двинской залив	9 600	420	49

### 1.1.2 Батиметрия

Белое море имеет сложный рельеф дна, наибольшие глубины наблюдаются в северо-западной части Бассейна и юго-восточной части Кандалакшского залива (рисунок 2). Главная впадина Бассейна в виде широкого желоба тянется с северо-запада на юго-восток и составляет главную ось моря. В Кандалакшском заливе, в районе мыса Турьего, глубина желоба достигает максимальной величины – 340 м. Центральная часть моря имеет глубины 100-200 м. Юго-восточная оконечность желоба образует Двинской залив.

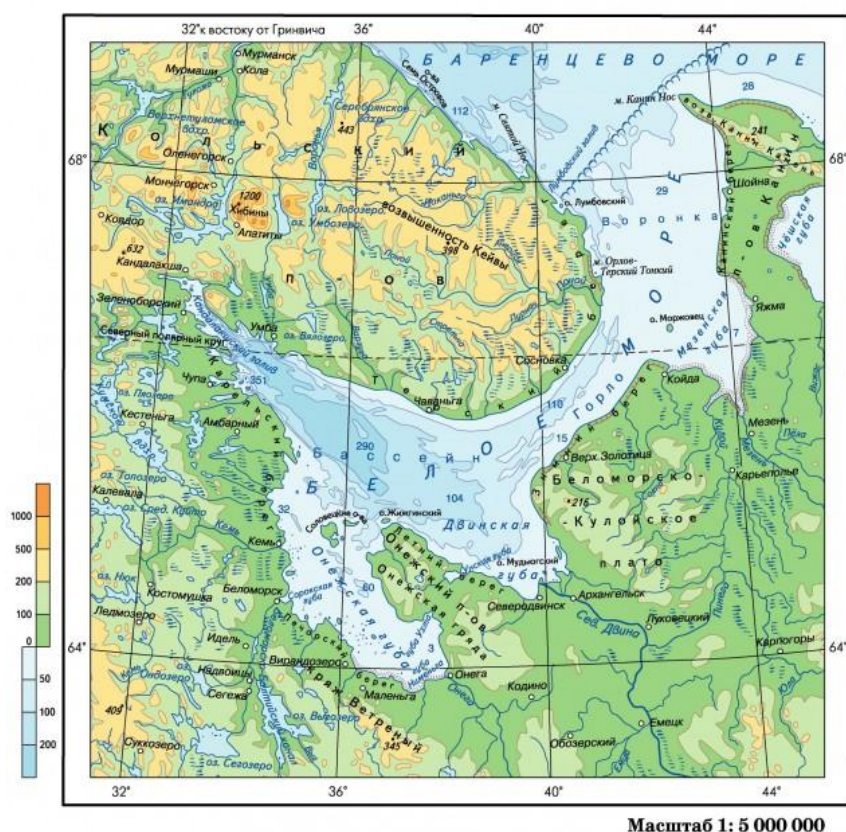


Рисунок 2 – Батиметрическая карта Белого моря [4]

Дно Онежского залива приподнято по сравнению с другими частями Белого моря, хотя по дну протягивается неглубокий желоб, параллельный

главной оси. В Двинском и Онежском заливах небольшие глубины, которые не превышают 50 м. Дно Горла моря представляет собой подводный желоб глубиной около 50 м, вытянутый вдоль пролива несколько ближе к Терскому берегу. Северная часть моря наиболее мелководна. Глубины Воронки и Мезенского залива не превышают 50 м. Дно здесь весьма неровное, особенно у Канинского берега и входа в Мезенский залив. Этот район усеян множеством банок, которые распределяются несколькими грядами и известны под названием «Северные кошки». Мелководность северной части и Горла по сравнению с Бассейном затрудняет его водообмен с Баренцевым морем, что отражается на гидрологических условиях Белого моря [1, 2, 3].

## 1.2 Горло Белого моря

### 1.2.1 Течения

Горизонтальная циркуляция вод Белого моря складывается под совокупным воздействием ветра, речного стока, приливов, компенсационных потоков, поэтому она разнообразна и сложна в деталях. Результирующее движение образует направленное против часовой стрелки перемещение вод, свойственное морям Северного полушария [3].

В Горле при интенсивном приливо-отливном перемешивании смешиваются большие массы воды, поступающие из Баренцева и Белого морей. В результате в Горле температура и соленость вод от поверхности до дна почти одинаковы, а на границе Горла с Бассейном формируется фронт. В Горле Белого моря существуют два постоянных течения. Первое течение получило название «питающего», оно направлено на юго-запад вдоль Терского берега, второе течение получило название «сточного», оно направлено на северо-восток вдоль Зимнего берега (рисунок 3) [3, 6].

Питающее течение поставляет в Белое море баренцевоморские воды, они огибают северную часть Терского берега. Воды течения на пути к Горлу опресняются и входят в Горло уже переработанными.

По рисунку 3, на котором представлена схема постоянных поверхностных течений Белого моря видно, что питающее течение, выйдя из Горла, следует вдоль Кандалакшского берега, включаясь в общий циклонический круговорот. Далее в Белом море воды течения значительно видоизменяются, под действием смешивания с водами мелких и крупных рек, после чего вновь входят в Горло, но уже в виде сточного течения. При этом физико-химические характеристики сточного течения довольно сильно отличаются от вод питающего течения. В пределах Горла воды питающего и сточного течений частично перемешиваются в результате горизонтального турбулентного обмена, и некоторая доля вод сточного течения возвращается обратно [6].

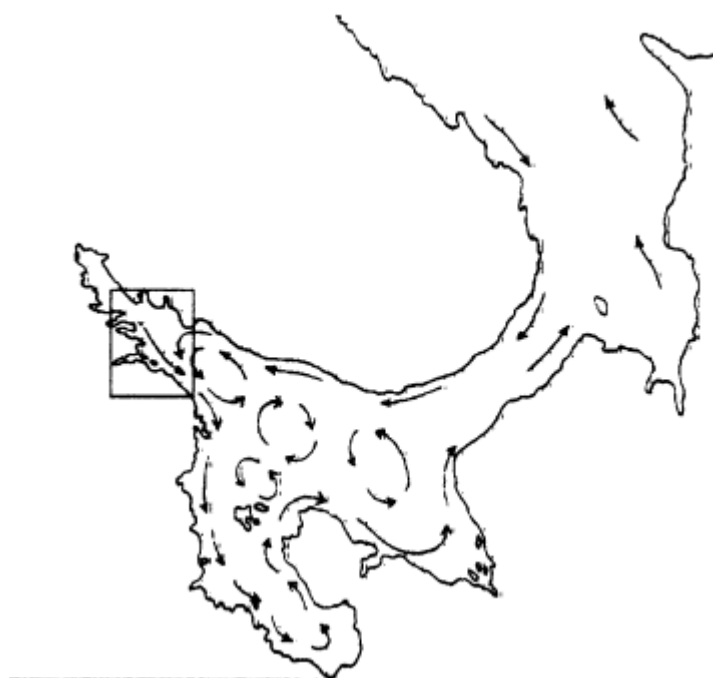


Рисунок 3 – Схема постоянных поверхностных течений Белого моря [6]

В Горле Белого моря баренцевоморские воды существенно видоизменяются под действием частичного опреснения и вертикального и горизонтального турбулентного обмена. Благодаря гидрологическим процессам, которые круглогодично происходят в Горле, определяется постоянное обновление всего объема вод Белого моря [6].

Особое значение гидрологических процессов в Горле заключается в формировании глубинных вод Белого моря. Глубинные воды образуются здесь зимой из вод питающего течения, которые охлаждаются до температуры около  $-1,5^{\circ}\text{C}$  и, имея соленость 30 ‰, в силу высокой плотности стекают на глубины Бассейна и заливов. Находясь еще в Горле, эти воды подвергаются интенсивному вертикальному перемешиванию и обогащаются кислородом, а этим, в свою очередь, обеспечивается хорошая аэрация глубоководных впадин Белого моря [6].

### 1.2.2 Приливы

В Белом море хорошо выражены приливы, представленные на рисунке 4. Поступательная приливная волна из Баренцева моря распространяется вдоль оси Воронки до вершины Мезенского залива. Проходя поперек входа в Горло, она вызывает волны, проходящие через Горло в Бассейн, где они отражаются от Летнего и Карельского берегов. Сложение отраженных от берегов и набегающих волн создает стоячую волну, которая создает приливы в Горле и Бассейне Белого моря. Они имеют правильный полусуточный характер. Благодаря конфигурации берегов и характеру рельефа дна, наибольшая величина прилива около 7,0 м наблюдается в Мезенском заливе, у Канинского берега, Воронки и у о. Сосновец, в Кандалакшском заливе она несколько превышает 3 м [3].



Рисунок 4 – Течения и характер приливов в Белом море (1 – полусуточные, 2 – полусуточные мелководные) [3]

Скорость приливного течения в начале его действия нарастает быстро и уже в первый час оно достигает 1 мили в час. Наибольшая скорость приливного течения достигается в проливе между мысом Орловским (Терским) и Большой Орловской мелью – 2,4 мили в час. Скорость течения к югу от параллели Орловского маяка до Поноя меньше, достигает только 1,9 мили в час. Падение скорости приливного течения происходит в общем медленнее, чем нарастание, но в некоторых местах, например, в районе Орловский (Терский) маяк-остров Гораинов очень быстро [5].

Смена приливного течения на отливное совершается по движению часовой стрелки и прижимает к берегу; при смене отливного течения на приливное отжимает от берега. Забрав силу, отливное течение в продолжение первого часа также прижимает несколько к берегу, а в последующее время следует параллельно ему. Отливное течение идет вдоль Терского берега, следуя его изгибам и румбами обратными приливному [5].

Нарастание скорости отливного течения происходит быстро: уже в первый час своего действия оно достигает 1-2 мили в час. В следующие часы скорость течения постепенно увеличивается, достигая наибольшей величины к середине периода отливного течения, а в некоторых пунктах несколько позже, т. е. ближе к концу отливного течения. Уменьшение скорости отливного течения к концу его происходит быстро, в некоторых районах почти на милю за один час [5].

Скорость отливного течения, как и приливного, к северу и к югу от параллели Орловского (Терского) маяка меньше [5].

В обычных условиях приливное течение продолжается 5 часов, отливное течение, в противоположность приливному, в различных местах различна от 4 до 6 часов [5].

При сильных попутных ветрах скорость и продолжительность как приливного, так и отливного течения увеличивается, при встречных скорость течения и продолжительность его падает [5].

### 1.2.3 Водные массы

Основными источниками формирования водных масс Белого моря служат баренцевоморские и материковые воды. В результате смещения этих основных водных масс появляется ряд новых. Речные воды в чистом виде встречаются только в вершинах заливов, а баренцевоморские — в Воронке. Горло Белого моря занято водной массой, отличающейся постоянством характеристик по глубине, что является следствием интенсивного перемешивания в этом районе [7].

Зимой выделяются три водные массы: баренцевоморская, Воронки и Горла, представлены на рисунке 5 (а). Баренцевоморские воды занимают всю западную половину Воронки, простираясь на юг вплоть до мыса

Терско-Орловский-Тонкин. Это однородные хорошо перемешанные воды с температурой 2,18 °С и соленостью 34,28 ‰. Неизменна с глубиной и концентрация кислорода [7].

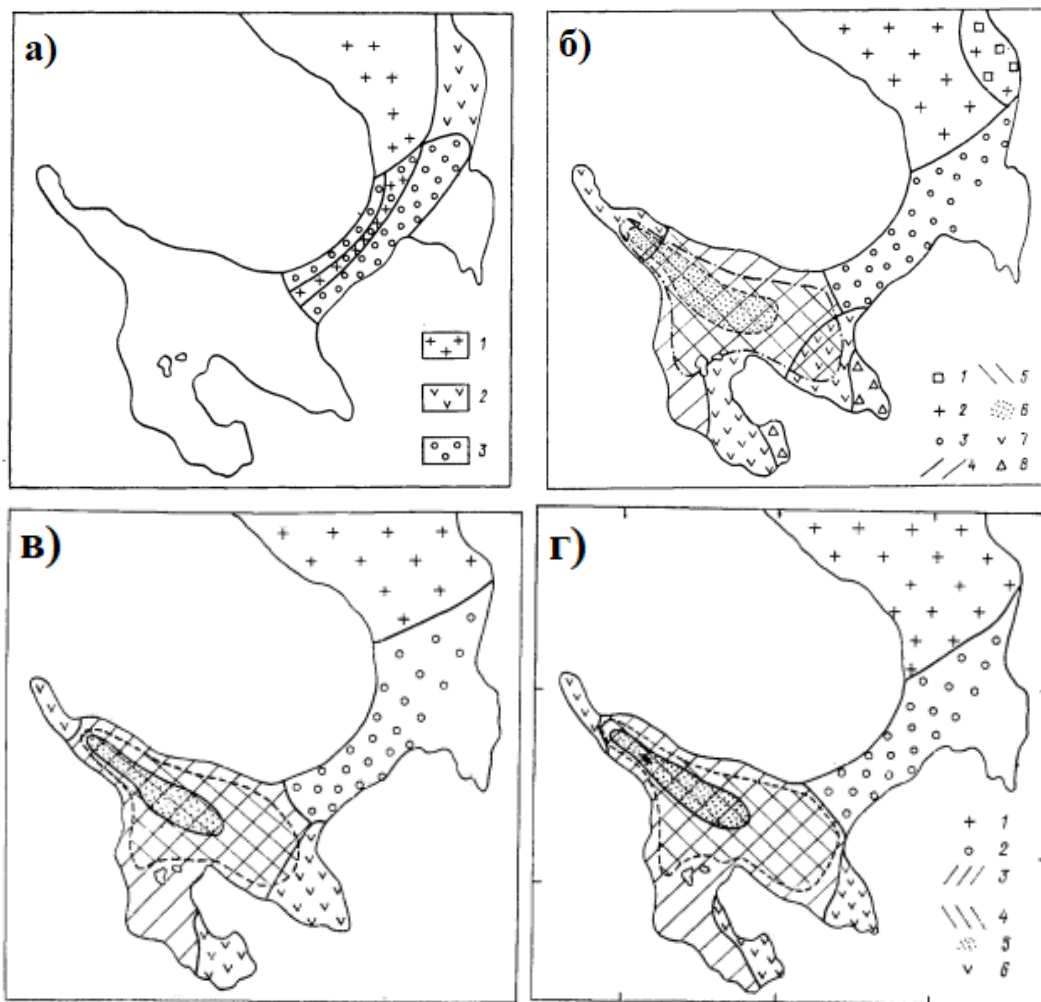


Рисунок 5 – Распределение водных масс в Горле и Воронке Белого моря:  
 а) зимой (водные массы: 1 – Баренцевоморская, 2 – Воронки, 3 – Горла),  
 б) весной (водные массы: 1 – Воронки, 2 – Баренцевоморская; 3 – Горла,  
 4 – поверхностная ВМ Бассейна, 5 – промежуточная, 6 – глубинная,  
 7 – распресненные воды заливов, 8 – слабо трансформированные речные воды),  
 в) летом и г) осенью: (1 – Баренцевоморская, 2 – Горла, 3 – поверхностная ВМ  
 Бассейна, 4 – промежуточная, 5 – глубинная, 6 – распресненные воды заливов)

[7]



В Горле Белого моря выделяются две водные массы, водная масса Горла на поверхности и баренцевоморская, у дна. В Горле происходит постепенный рост солёности по направлению к Воронке от 26,4 ‰ у мыса Зимнегорский до 28,7 ‰ у острова Моржовец [7].

Зимой в Воронке и Горле Белого моря баренцевоморские воды залегают в придонных горизонтах на всем протяжении Горла. Температура горловских вод находится в пределах 1,4-1,0 °С ниже нуля. Вертикальная стратификация в водной массе Горла практически отсутствует, что свидетельствует о полном перемешивании. Также об этом говорит отсутствие градиентов и высокая концентрация O<sub>2</sub> – до 8,22 ‰ у дна [7].

Весной большую роль в гидрологической структуре моря начинают играть речные воды в связи с увеличением стока рек. Горловская водная масса занимает все Горло и южную часть Воронки (рисунок 5 (б)). Для ее однородных по вертикали вод характерна температура 1,0-1,7 °С и солёность 28,5-28,8 ‰. От вод Баренцева моря они отделяются фронтальной зоной, которую условно можно обозначить линией, соединяющей мыс Терско-Орловский и реку Шойну [6].

Летом Южная часть Воронки и все Горло заполнены водной массой Горла, представлено на рисунке 5 (в). Это полностью перемешанные воды при небольшом падении температуры с 6,85 °С на поверхности до 5,96 °С у дна и слабом росте солёности с глубиной от 27,83 до 28,42 ‰ [6].

Осенью воды Горла имеют температуру 5,6-6,1 °С и солёность 28,8-30,0‰. Для них характерен небольшой рост солёности по направлению от Бассейна к Воронке [6].

На формирование водных масс большое влияние оказывают процессы перемешивания. В частности, приливное перемешивание формирует однородную вертикальную структуру вод Горла. Ветровое и конвективное перемешивание определяют глубину залегания поверхностных вод [6].

#### 1.2.4 Ветер и волнение

Белое море принадлежит к числу бурных морей. Наиболее сильное волнение 4-5 баллов и более, наблюдается в октябре-ноябре с северной части и Горле моря. Однако небольшие размеры водоема не позволяют развиваться крупным волнам. В Белом море преобладают волны высотой до 1 м. Изредка они достигают высоты 3 м и как исключение 5 м [3].

Ветры зонального направления оказывают большее влияние на ход температуры, чем на ход солености глубинных вод. И наоборот, изменения солености больше зависят от меридиональных ветров, чем изменения температуры, при этом температура имеет тенденцию понижаться при ветрах восточных направлений и возрастать при западных, а соленость – увеличиваться при южных ветрах и понижаться при северных [7].

В отличие от зональных, меридиональные ветры усиливают водообмен Баренцева и Белого морей и увеличивают поступление вод с высокой соленостью в Белое море. Так, юго-юго-западные ветры приводят к такой системе течений, при которой баренцевоморские воды поступают в Белое море вдоль Терского берега в Воронке, а далее на придонных горизонтах ближе к оси Горла. Следовательно, соленость глубинных вод будет возрастать [7].

В Бассейне и Горле максимальная скорость, ветра наблюдается при южных и юго-западных направлениях и 1 раз в 5 лет достигает 25-28 м/с, в порывах 34-37 м/с, 1 раз в 50 лет возможна скорость 30-32 м/с, в порывах 39-40 м/с [7].

### 1.2.5 Распределение температуры воды

В Горле среднегодовая температура поверхностного слоя составляет  $-2,2^{\circ}\text{C}$ . Зимой температура воды на поверхности колеблется в пределах от  $-1,7$  до  $-1,2^{\circ}\text{C}$ . Весной температура воды возрастает в среднем на  $2^{\circ}\text{C}$ . В летний период температура воды не выше  $9^{\circ}\text{C}$ . В осенний период происходит выравнивание температур. Средние температуры вод для отдельных месяцев меняются в Горле от  $-1,7$  до  $8,4^{\circ}\text{C}$  [1, 2, 3].

Сезонные различия в Горле заключаются в изменении величины температуры всей массы воды, а не в характере изменения ее с глубиной. Происходит это вследствие хорошего перемешивания. В отличие от Бассейна, в Горле внешние термические воздействия воспринимает вся масса воды как одно целое, а не от слоя к слою [1, 2, 3].

### 1.2.6 Распределение солености воды

В Белом море соленость обычно увеличивается от вершин заливов к центральной части Бассейна, хотя в каждый сезон наблюдаются свои особенности распределения солености. В зимний период около 60% солей поступает в Белое море, также отмечается наиболее интенсивное поступление солей в Белое море из Баренцева. Из-за этого соленость зимой на поверхности повсеместно повышена, а в Горле она равна  $29,0 - 30,0\%$ . В весенне-летнее время соленость вод моря уменьшается. В период межени соленость возрастает. Распределение солености на поверхности Белого моря показано ниже, на рисунке 6 видно, что соленость в Горле моря изменяется от 26 до  $29\%$  [1, 3].

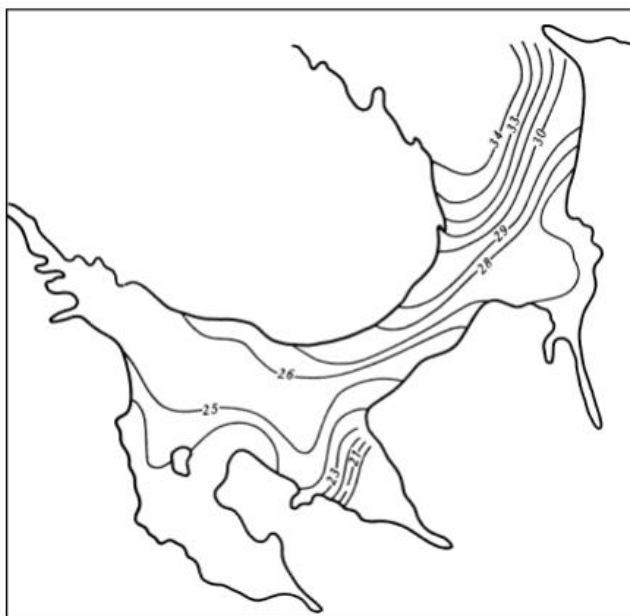


Рисунок 6 – Распределение солености на поверхности Белого моря [3]

### 1.2.7 Лед

Каждую зиму все море покрывается льдом, но это не сплошной покров, а постоянно дрейфующий лед, местами сгущенный, а местами разреженный под влиянием ветров и течений. Раньше всего в конце октября лед появляется в устье Мезени, а позднее всего в январе – у Терского берега Воронки и Горла. Ледовый покров Белого моря на 90% состоит из плавучих льдов. Из-за постоянного выноса льда в Баренцево море, в Белом море среди зимы постоянно образуются полыньи, которые быстро затягиваются молодым льдом. Плавучий лед имеет толщину 35-40 см, но в суровые зимы может достигать 135 и даже 150 см. К концу мая обычно все море освобождается ото льдов [2, 3].

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Исходные данные

Исходные данные взяты из архива GLORYS12V1 (Copernicus), [https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL\\_REANALYSIS\\_PHY\\_001\\_030](https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030).

Выбраны среднемесячные значения температуры воды ( $T$ , °C), солёности ( $S$ , ‰) и скорости течений ( $V$ , м/с) с января 1993 года по декабрь 2019 года, на широтном разрез по  $66^{\circ}15'$  с. ш.,  $40^{\circ}$ - $42^{\circ}$  в. д., 25 станций, 20 горизонтов (рисунок 7).

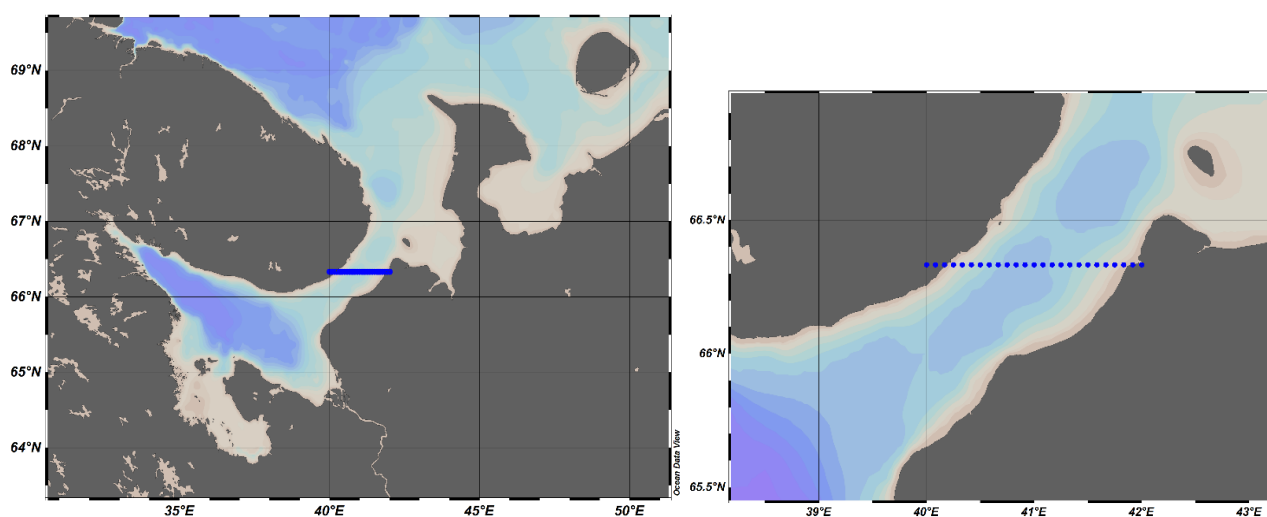


Рисунок 7 – Географическое расположение широтного разреза по  $66^{\circ}15'$  с. ш.,  $40^{\circ}$ - $42^{\circ}$  в. д. в Горле Белого моря

Исходные данные усреднялись для двух месяцев (февраля и августа) за два периода: 1993-1997 и 2015-2019 гг. В результате получены 4 матрицы для последующего многомерного анализа размерностью 500 ячеек разреза (25 станций  $\times$  20 горизонтов) на 3 характеристики ( $T$ ,  $S$ ,  $V$ ).

## 2.2 Методы исследования

### 2.2.1 Кластерный анализ

Кластерный анализ или метод автоматической классификации – это совокупность методов и алгоритмов теории распознавания образов, направленных на решение процедуры классификации множества объектов в многомерном пространстве признаков. Классификация – это разбиение множества объектов (явлений, процессов) на ряд однородных подмножеств (классов, групп) по наиболее существенным признакам их сходства. Объекты, отнесенные к одному классу, должны быть сходны между собой и отличаться от объектов других классов [8].

Классификация разделяется на специальную и естественную. В специальной классификации признаки задаются заранее и их число обычно невелико. В естественной классификации разбиение проводится по комплексу различных признаков. Пример естественной классификации в гидрометеорологии – это описание климата или выделение водных масс. Специальная классификация — это частный случай естественной классификации. Так, выделение водных масс по температуре и солёности – это уже специальная классификация [8]. В данной работе была применена естественная классификация, т. к. количество классов (водных масс) и их характеристик заранее были не известны, но ядра водных масс должны существенно отличаться друг от друга.

Для того, чтобы посмотреть, как изменяются водные массы в Горле моря для февраля и августа за два периода: 1993-1997 и 2015-2019 гг. исходные данные (T, S и V) стандартизировались, по формуле:  $x = (x_i - \bar{x})/\sigma$ , где  $x_i$  –  $i$ -значение характеристики;  $\bar{x}$  – среднеарифметическое значение выборки;  $\sigma$  – стандартное отклонение выборки.

Выборка стандартизированных значений обладает следующими свойствами:

1. Среднее значение выборки равно нулю;
2. Дисперсия выборки равна единице.

С помощью программы Past 4, методом k-средних было выполнено распределение температуры воды, солености воды и скорости течений по классам.

Метод k-средних, относится к итеративным эвристическим алгоритмам. Эвристические алгоритмы основаны на выделении в многомерном пространстве компактных групп точек в виде геометрических образов и, в свою очередь, могут быть разделены на простые и сложные (итеративные) [9].

Название и обоснование k-метода было дано в 1967 году Мак-Куином. Метод предполагает, что число классов известно заранее, т.е. до начала процесса кластеризации. Программа начинает с k случайно выбранных кластеров, а затем изменяет принадлежность объектов к ним, чтобы минимизировать изменчивость внутри кластеров и максимизировать изменчивость между кластерами [9].

Суть метода состоит в следующем. Пусть в нашем распоряжении имеется исходная совокупность из n объектов, каждый из которых характеризуется m признаками. Требуется разбить эту совокупность на k кластеров. Исследователем задается определенное число классов и k точек в качестве «центров» этих классов. Если же центры классов не заданы, то они отбираются случайным образом самой программой. Эти заданные или случайно отобранные точки принимаются за первоначальные эталоны, т.е. центры кластеров; каждому из них присваивается порядковый номер, который одновременно является и номером кластера [9].

## 2.2.2 Статистические методы оценивания

Статистическая проверка гипотез – это раздел математической статистики, устанавливающий наличие или отсутствие предположений относительно свойств случайной величины. В математической статистике основной является нулевая гипотеза – это предположение об отсутствии различий в тех или иных свойствах случайного процесса. Формулировка нулевой гипотезы:  $H_0: \bar{x}_1 = \bar{x}_2$  (среднее арифметическое первой выборки равно среднему арифметическому второй выборки). Также существует альтернативная гипотеза, являющаяся логическим отрицанием нулевой гипотезы. Формулировка альтернативной гипотезы:  $H_0: \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$  [9].

Нулевая гипотеза всегда подлежит проверке, проверка проводится для того, чтобы установить при каких результатах наблюдений рассматриваемая гипотеза отклоняется, а при каких – нет. Проверка проводится с помощью статистических критериев.

В данной работе для проверки нулевой гипотезы выбран  $t^*$  – критерий Стьюдента. Расчет эмпирического значения критерия Стьюдента:

$$t^* = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{N_1 D_1 + N_2 D_2}} \sqrt{\frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 - 2)}{N_1 + N_2}}$$

где  $\bar{x}_1$  и  $\bar{x}_2$  – среднеарифметическое значение соответствующей выборки;  $D_1$  и  $D_2$  – дисперсия соответствующей выборки;  $N_1$  и  $N_2$  – длина ряда соответствующей выборки.

Критическое значение критерия Стьюдента  $t_{кр}(\alpha, \nu)$  определяется по уровню значимости  $\alpha = 0,05$  и числу степеней свободы  $\nu = (N_1 + N_2 - 2)$ , где  $N_1$  и  $N_2$  – длина ряда соответствующей выборки.

После расчета  $t^*$  и  $t_{кр}(\alpha, \nu)$ , осуществляется проверка следующего неравенства:  $|t| > t_{кр}(\alpha, \nu)$ . Если данное неравенство выполняется, то нулевая



гипотеза отвергается, из этого делается вывод, что различия в средних значениях двух выборок статистически значимы, при заданном  $\alpha$ . В противоположном случае, т. е. при  $|t| < t_{кр}(\alpha, \nu)$ , нулевая гипотеза принимается, т. е. расхождения в средних значениях двух выборок не являются значимыми, при заданном  $\alpha$  [9].

В данной работе проводится проверка гипотезы о равенстве средних значений характеристик в выделенных водных массах за разные периоды времени. Проверка в данном случае нужна для того, чтобы посмотреть, как сильно и насколько значимо изменяются выбранные характеристики в водных массах.

### 3 Среднее многолетнее состояние гидрологических характеристик в Горле Белого моря

По исходным данным с помощью программы Ocean Data View (ODV) были построены разрезы средних многолетних данных по температуре воды, солёности и скорости течений. Разрезы представлены ниже на рисунках 8, 9 и 10.

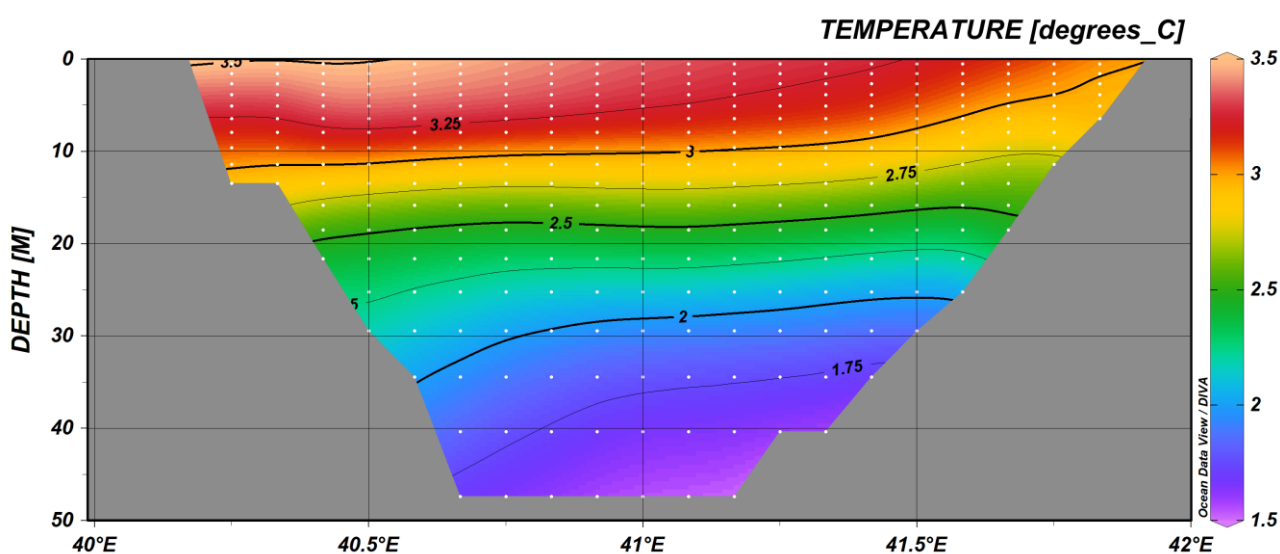


Рисунок 8 – Среднее многолетнее распределение (1993-2019) температуры воды на широтном разрезе на 66°15' с. ш. в Горле Белого моря

Рассмотрим рисунок 8, где показано распределение температуры воды на широтном разрезе на 66°15' с. ш. в Горле Белого моря. Наибольшая температура воды наблюдается на поверхности у западных берегов и составляет 3,5 °С, до 10 м температура уменьшается почти до 3 °С. Ближе к восточным берегам в слое от 0 до 10 м, значения температуры воды равны 3 °С. Глубже, к 20 м на всем разрезе температура постепенно выравнивается до 2,5 °С. Но к 30 м начинает более интенсивно охлаждаться с глубиной, у восточного берега охлаждение температуры происходит быстрее, чем у

западного. Таким образом, более холодная температура наблюдается у дна (около 50 м) между  $41^\circ$  и  $41,5^\circ$  восточной долготы и равна  $1,5^\circ\text{C}$ . Начиная с 25 м температура воды у разных берегов, но на одинаковых глубинах различаются на  $0,25^\circ\text{C}$ .

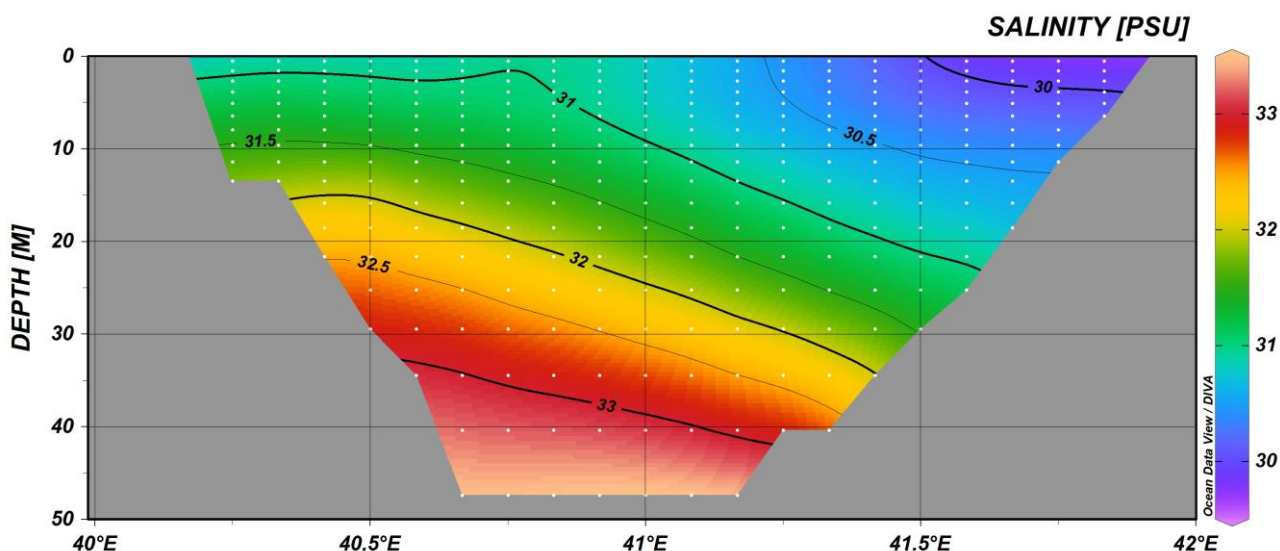


Рисунок 9 – Среднее многолетнее распределение (1993-2019) солёности воды на широтном разрезе на  $66^\circ 15'$  с. ш. в Горле Белого моря

Рассмотрим рисунок 9, распределение солёности воды на широтном разрезе на  $66^\circ 15'$  с. ш. в Горле Белого моря. На поверхности воды солёность варьируется от 30 ‰ до 31 ‰. Наименьшие значения солёности наблюдаются на поверхности у восточного берега – 30 ‰. К середине разреза ( $41^\circ$  в. д.) солёность увеличивается до 31 ‰ и до  $41^\circ$  в. д. не изменяется.

С глубиной солёность воды растёт, осолонение происходит быстрее у западных берегов, т. к. у них на глубине 15 м  $S = 32$  ‰, а у восточных берегов на той же глубине  $S = 30,6$  ‰. Такое изменение солёности прослеживается до дна.

Наибольшая солёность наблюдается у дна (около 50 м) ближе к западному берегу ( $40,7^\circ$  в. д.),  $S \geq 33$  ‰.

Рассмотрим рисунок 10, распределение значений скорости течений на широтном разрезе на  $66^{\circ}15'$  с. ш. в Горле Белого моря. На рисунке видны отрицательные и положительные значения скорости – это говорит о том, что в Горле имеется 2 направления течений. Связано это с тем, что Горло Белого моря является проливом, и через него выходят и поступают водные массы в Белое море.

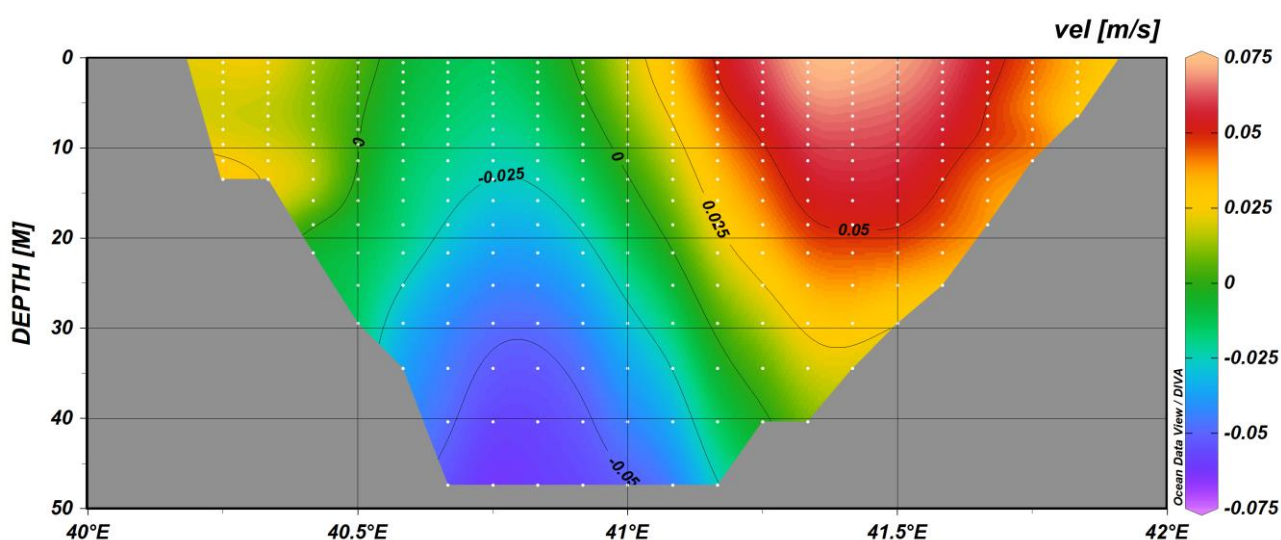


Рисунок 10 – Среднее многолетнее распределение (1993-2019) скорости на широтном разрезе на  $66^{\circ}15'$  с. ш. в Горле Белого моря

На поверхности у восточных берегов скорость течения положительная. В это месте течение выносит водные массы Белого моря в Баренцево. Наибольшая скорость достигается на поверхности и равна  $7,5$  см/с.

На дне у западных берегов значений скорости противоположные, т. е. течение направлено в сторону Белого моря. Это течение вносит водные массы Баренцева моря в Белое. По приближении ко дну скорость течения увеличивается, максимум скорости данного течения равен  $-7,5$  см/с.

Также от поверхности до дна прослеживаются значения равные нулю, в этих местах происходит смена направления течений. Изотаха, равная нулю,

начинается у западных берегов на  $40,5^\circ$  восточной долготы, кривая вертикально поднимается до поверхности, практически не изменяясь. Далее на середине разреза, кривая вновь появляется и изменяется по диагонали ко дну.

## 4 Кластерный анализ водных масс в Горле Белого моря

### 4.1 Распределение водных масс в пространстве в разные климатические периоды

Для того чтобы сравнить как изменились исследуемые характеристики в течении времени были выбраны два периода: 1993-1997 год и 2015-2019 год. Также рассматривались 2 месяца: февраль и август, для того чтобы проследить изменения характеристик зимой и летом. В феврале достигается максимально устойчивая ледовая обстановка – зимнее состояние, а через 6 месяцев, в августе – летнее состояние, менее спокойнее, на воды Белого моря влияют следующие факторы: взаимодействие с атмосферы с водной поверхностью (солнечная радиация, осадки и прочее), приток пресных рек и поверхностное перемешивание за счет ветров, так как водная поверхность не покрыта льдом. Исходя из этого, в феврале было выбрано 3 класса, которые вполне достаточно отражают ледовое состояние зимой. А в августе – 4 класса, которые более полно отражают особенности, появившиеся за летний период.

Первоначально кластерный анализ проводился только по данным о температуре и солености воды. Было выделено 3 класса в феврале и 4 класса в августе. Получившиеся результаты представлены на рисунках 11 и 13.

Как видно из рисунков, зимой были выявлены следующие водные массы:

- 1 класс – Баренцевоморская водная масса;
- 2 класс – промежуточная водная масса Горла;
- 3 класс – поверхностная водная масса Горла;

Летом состав водных масс увеличился, в результате влияния факторов, описанных ниже:

- 1 класс – Баренцевоморская водная масса;
- 2 класс – промежуточная водная масса Горла;

3 класс – Беломорская поверхностная водная масса;

4 класс – поверхностная водная масса Горла.

Баренцевоморская водная масса несет в себе баренцевоморские воды, которые в виде «питающего течения» движутся от Воронки к Бассейну Белого моря, на протяжении всего Горла. На востоке пролива отмечается поверхностная водная масса Горла. Результат смешения этих двух масс образует промежуточную водную массу Горла. Летом выделяется еще одна поверхностная водная масса, на востоке пролива, она содержит в себе более пресные воды, которые появляются за счет увеличения стока рек, и называется беломорская поверхностная водная масса.

Далее добавили к характеристикам, по которым выполнялся кластерный анализ, скорость течений (рисунок 12 и 14), для того чтобы более точно выделить границы водных масс. Из-за добавления в анализ скорости течений в феврале объем баренцевоморской водной массы стал немного меньше и, соответственно увеличился объем промежуточной водной массы Горла. В августе распределение водных масс изменилось в принципе. При сравнении климатических периодов оказалось, что Баренцевоморская водная масса увеличилась в объеме, что в первом, что во втором пятилетии. Распределение поверхностной водной массы Горла и беломорской поверхностной водной массы: поверхностная водная масса Горла в первом пятилетии находилась под беломорской поверхностной водной массой, с добавлением скорости классы расположились на одинаковых горизонтах. Беломорская поверхностная водная масса во втором пятилетии расположилась ближе к восточному берегу. Большая часть промежуточной водной массы Горла в первом пятилетии сместилась ближе к восточному берегу. Во втором пятилетии водная масса у западного берега поднялась, у восточного опустилась по глубине, примерно на 5 м.

Добавление скорости помогло более точно определить расположение водных масс, что отражено на рисунках 12 и 14.

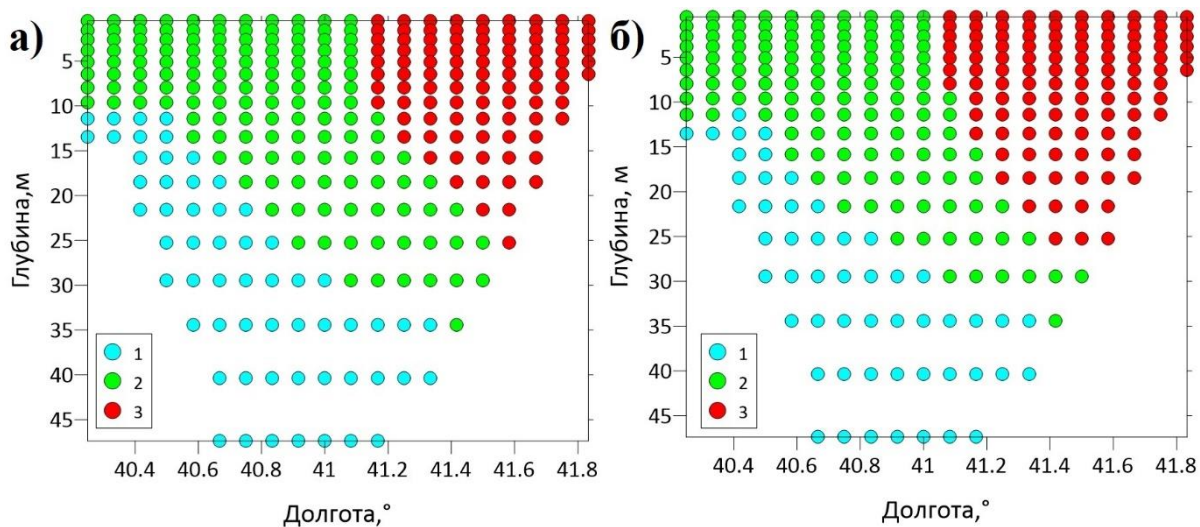


Рисунок 11 – Распределение классов по T, S в феврале за период 1993-1997 год (а), 2015-2019 год (б) (водные массы: 1 – Баренцевоморская; 2 – промежуточная водная масса Горла; 3 – поверхностная водная масса Горла)

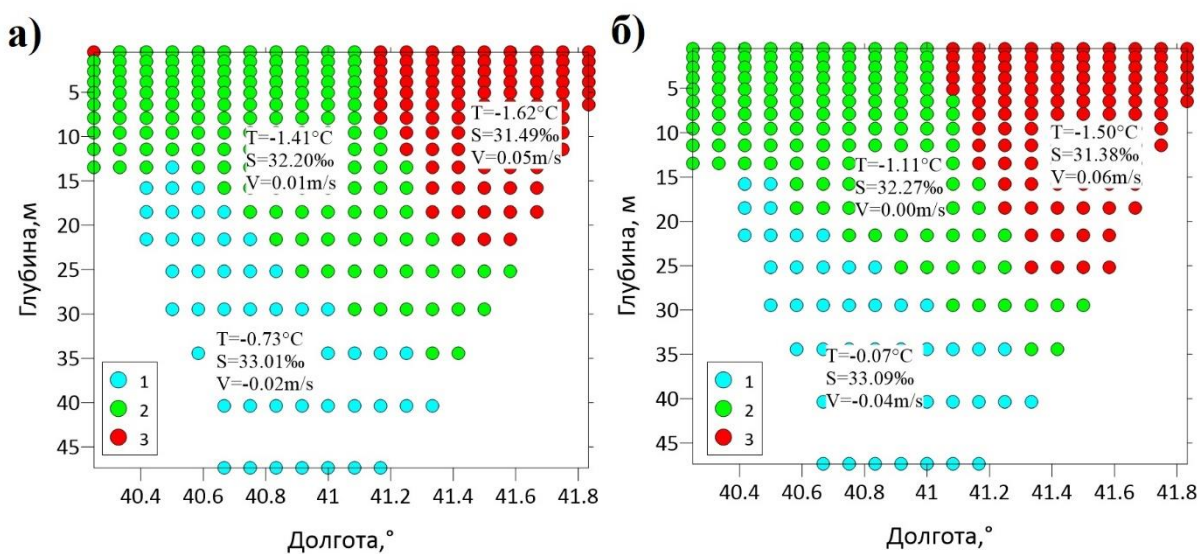


Рисунок 12 – Распределение классов по T, S и V в феврале за период 1993-1997 год (а), 2015-2019 год (б) (водные массы: 1 – Баренцевоморская; 2 – промежуточная водная масса Горла; 3 – поверхностная водная масса Горла)



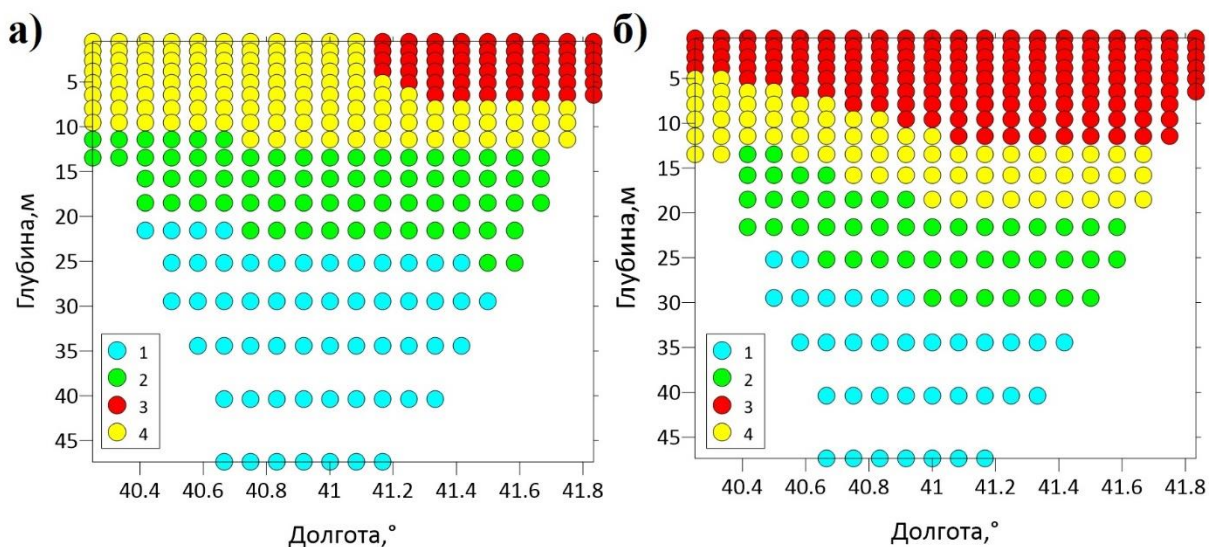


Рисунок 13 – Распределение классов по T, S и в августе за период 1993-1997 год (а), 2015-2019 год (б) (Водные массы: 1 – Баренцевоморская; 2 – промежуточная водная масса Горла; 3 – беломорская поверхностная; 4 – поверхностная водная масса Горла)

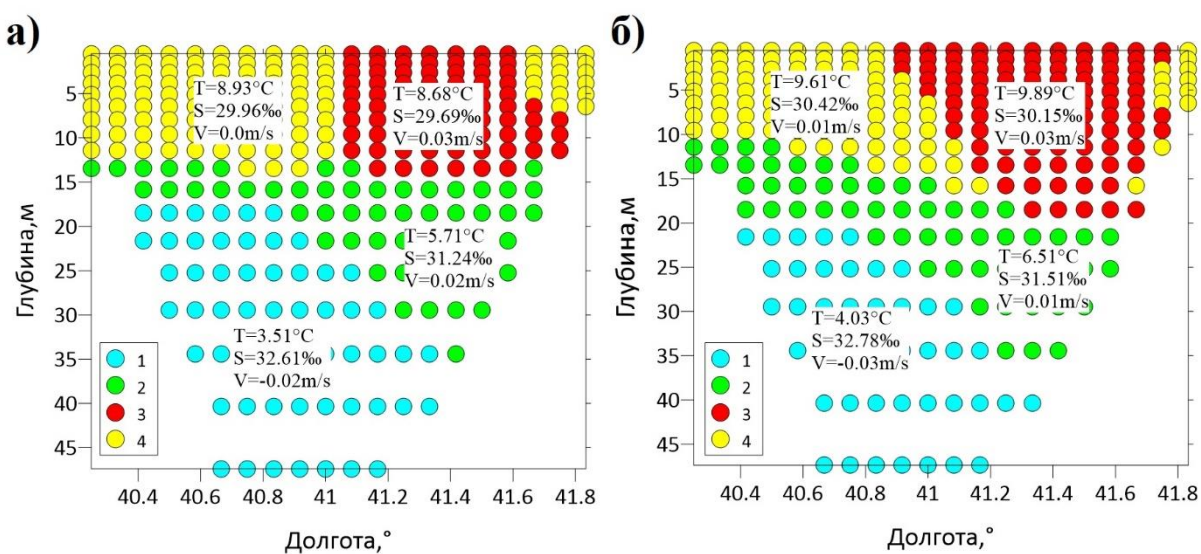


Рисунок 14 – Распределение классов по T, S и V в августе за период 1993-1997 год (а), 2015-2019 год (б) (Водные массы: 1 – баренцевоморская; 2 – промежуточная водная масса Горла; 3 – беломорская поверхностная; 4 – поверхностная водная масса Горла)

Таким образом, по характеристикам T, S и V в Горле Белого моря в феврале выделяется 3 класса, как представлено на рисунке 12 (а, б). Первый класс выделен голубым цветом, расположен у дна, ближе к западному берегу, это относительно теплая, соленая Баренцевоморская водная масса, несущая воды на юг. Второй класс выделен зеленым цветом, расположен между 1 и 3 классом – промежуточная водная масса Горла, имеющая слабое северное течение и промежуточное состояние T и S. Третий класс выделен красным цветом, расположен на поверхности у восточного берега, это холодная распресненная поверхностная водная масса Горла, с северным течением. Средние значения характеристик каждой водной массы представлены на рисунке 12 и в таблице 4.

Около половины рассматриваемого разреза, приходится на промежуточную водную массу Горла, около 35 % занимает поверхностная водная масса Горла, и оставшиеся около 15 % – Баренцевоморская водная масса.

Сравним объемы водных масс в феврале за периоды 1993-1997 и 2015-2019 гг. (таблица 2). Баренцевоморская водная масса уменьшилась с 16,9 до 15,2 %, промежуточная водная масса Горла – с 51,0 до 47,6 %, а поверхностная водная масса Горла увеличилась с 32,1 до 37,2 %.

Таблица 2 – Объем водных масс на широтном разрезе в феврале за периоды 1993-1997 и 2015-2019 гг.

Класс	Название водной массы	1993-1997 год	2015-2019 год
1	Баренцевоморская водная масса	16,9 %	15,2 %
2	Промежуточная водная масса Горла	51,0 %	47,6 %
3	Поверхностная водная масса Горла	32,1 %	37,2 %

В августе в Горле Белого моря выделяется 4 класса, как представлено на рисунке 14 (а, б). Первый, второй классы имеют такие же названия водных масс, что и зимой. Третий класс выделен красным цветом, в нем выделяется новая поверхностная водная масса, которая расположена на поверхности у восточных берегов. Водная масса имеет теплые более пресные воды, за счет летнего рапреснения речным стоком, и называется беломорской водной массой. Ее воды выносятся в Баренцево море, т. е. течение имеет северное направление. Четвертый класс выделен желтым цветом, имеет тоже происхождение, что и водная масса 3 класса в феврале – поверхностная водная масса Горла. Она имеет небольшие значения солености и довольно теплые воды, малая часть ее вод расположена у восточного берега, основная – у западного.

Также сравним объемы водных масс в августе за те же периоды 1993-1997 и 2015-2019 гг. (таблица 3). Большую часть объема около 35 % и 30 %, на исследуемом разрезе в Горле Белого моря, занимают воды Беломорской водной массы и поверхностной водной массы Горла, соответственно. Около 18 % занимает промежуточная водная масса Горла, и остальная часть вод приходится на Баренцевоморскую водную массу – около 17 %.

Таблица 3 – Объем водных масс на широтном разрезе в августе за периоды 1993-1997 и 2015-2019 гг.

Класс	Название водной массы	1993-1997 год	2015-2019 год
1	Баренцевоморская водная масса	18,9 %	14,5 %
2	Промежуточная водная масса Горла	18,2 %	18,9 %
3	Беломорская поверхностная водная масса	25,7 %	33,8 %
4	Поверхностная водная масса Горла	37,2 %	32,8 %

За разные климатические периоды Баренцевоморская водная масса уменьшилась с 18,9 до 14,5 %, промежуточная водная масса Горла увеличилась

с 18,2 до 18,9 %, и беломорская поверхностная водная масса – с 25,7 до 33,8 %, а поверхностная водная масса Горла уменьшилась с 37,2 до 32,8 %.

Если рассматривать, как изменяются объемы водных масс от зимы к лету, то можно отметить следующее.

В первом пятилетии (1993-1997 год) летом баренцевоморская водная масса немного увеличивается: в феврале ее объем равен 16,9 %, в августе – 18,9 %, также увеличивается поверхностная водная масса Горла – с 32,1 % до 37,2 %. А промежуточная водная масса Горла к лету значительно уменьшается в 2,80 раз, с 51,0 % до 18,2 %. Уменьшение водной массы происходит из-за того, что летом появляется еще одна водная масса – беломорская поверхностная водная масса. Она занимает область поверхностной водной массы Горла, которая располагалась здесь в зимнее время, а поверхностная водная масса Горла сместилась к западному берегу и заняла область промежуточной водной массы. Беломорская поверхностная водная масса выделена красным цветом, ее объем в августе равен 25,7 %. Средние значения характеристик каждой водной массы представлены на рисунке 14 и в таблице 5.

Через 20 лет, во втором пятилетии (2015-2019 год) распределение водных масс изменяется практически также как в первом пятилетии (1993-1997 год). Объем всех водных масс уменьшился к лету: баренцевоморская водная масса уменьшается с 15,2 % до 14,5 %, промежуточная водная масса Горла – в 2,5 раз, с 47,7 % до 18,9 %, поверхностная водная масса Горла – с 37,2 % до 32,8 %. Связано это также с появлением четвертой водной массы - беломорской поверхностной водной массой, ее объем летом равен 33,8 %.

## 4.2 Изменение характеристик водных масс в разные климатические периоды

### 4.2.1 Изменение средних характеристик

Средние характеристики водных масс в феврале за оба периода, практически не изменились (таблица 4). Средняя температура воды во втором пятилетии (2015-2019 год) выше, чем в первом (1993-1997 год): температура баренцевоморской водной массы увеличилась с  $-0,73\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$ , промежуточной водной массы Горла – с  $-1,41\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-1,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , поверхностной водной массы Горла – с  $-1,62\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-1,50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 4 – Средние, максимальные и минимальные значения  $T$ ,  $S$  и  $V$  в феврале за периоды 1993-1997 и 2015-2019 гг.

Период		1993-1997 год			2015-2019 год		
Характеристика		$x$	$x_{\max}$	$x_{\min}$	$x$	$x_{\max}$	$x_{\min}$
Баренцевоморская водная масса	$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	-0,73	-0,31	-1,13	-0,07	0,39	-0,61
	$S, \text{ }_{\text{‰}}$	33,01	33,54	32,55	33,09	33,56	32,49
	$V, \text{ м/с}$	-0,02	0,05	-0,05	-0,04	0,04	-0,07
Промежуточная водная масса Горла	$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	-1,41	-0,91	-1,65	-1,11	-0,44	-1,49
	$S, \text{ }_{\text{‰}}$	32,20	32,60	31,73	32,27	32,72	31,65
	$V, \text{ м/с}$	0,01	0,06	-0,02	-0,004	0,06	-0,04
Поверхностная водная масса Горла	$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	-1,62	-1,45	-1,67	-1,50	-1,16	-1,63
	$S, \text{ }_{\text{‰}}$	31,49	32,09	31,17	31,38	31,86	31,07
	$V, \text{ м/с}$	0,05	0,07	0,03	0,06	0,09	0,02

Примечание:  $x$  – среднее значение;  $x_{\max}$  – максимальное значение;  $x_{\min}$  – минимальное значение.

Средняя соленость воды изменяется следующим образом: соленость баренцевоморской водной массы увеличилась с  $33,01\text{ }_{\text{‰}}$  до  $33,09\text{ }_{\text{‰}}$ , промежуточной водной массы Горла – с  $32,20\text{ }_{\text{‰}}$  до  $32,27\text{ }_{\text{‰}}$ , а соленость поверхностной водной массы Горла уменьшилась с  $31,49\text{ }_{\text{‰}}$  до  $31,38\text{ }_{\text{‰}}$ .

Скорость течений увеличилась в баренцевоморской водной массе с  $-0,02\text{ м/с}$  до  $-0,04\text{ м/с}$ , и в поверхностной водной массе Горла с  $0,05\text{ м/с}$

до 0,06 м/с, а в промежуточной водной массе Горла уменьшилась с 0,01 м/с до -0,004 м/с.

В целом в феврале средняя температура воды ко второму пятилетию (2015-2019 год) на всем разрезе увеличивается, причем с глубиной более интенсивно. Средняя соленость воды на глубинах увеличивается, примерно на 0,08 ‰, а на поверхности уменьшается, примерно на 0,10 ‰. Средние значения скорости течений увеличиваются у дна и на поверхности, а на промежуточных горизонтах уменьшаются.

В августе средние характеристики водных масс изменились следующим образом (таблица 5): температура воды и соленость во втором периоде (2015-2019 год) выше, чем в первом (1993-1997 год). Температура баренцевоморской водной массы увеличилась с 3,51 °С до 4,03 °С, промежуточной водной массы Горла – с 5,71 °С до 6,41 °С, поверхностной водной массы Горла – с 8,93 °С до 9,61 °С, беломорской поверхностной водной массы – с 8,68 °С до 9,89 °С.

Таблица 5 – Средние, максимальные и минимальные значения T, S и V в августе за периоды 1993-1997 и 2015-2019 гг.

Период		1993-1997 год			2015-2019 год		
		X	X <sub>max</sub>	X <sub>min</sub>	X	X <sub>max</sub>	X <sub>min</sub>
Баренцевоморская водная масса	T, °C	3,51	5,87	1,72	4,03	5,99	2,53
	S, ‰	32,61	33,42	31,55	32,78	33,47	31,91
	V, м/с	-0,02	0,01	-0,03	-0,03	0,01	-0,05
Промежуточная водная масса Горла	T, °C	5,71	7,39	2,63	6,41	8,20	3,66
	S, ‰	31,24	32,33	30,41	31,51	32,42	30,96
	V, м/с	0,02	0,03	-0,01	0,01	0,04	-0,02
Беломорская поверхностная водная масса	T, °C	8,68	9,47	7,13	9,89	10,53	7,32
	S, ‰	29,69	30,55	28,80	30,15	30,94	29,49
	V, м/с	0,03	0,04	0,01	0,03	0,04	0,02
Поверхностная водная масса Горла	T, °C	8,93	9,71	7,31	9,61	10,36	8,08
	S, ‰	29,96	30,98	28,70	30,42	31,05	29,47
	V, м/с	0,003	0,02	-0,01	0,01	0,02	0,00

Соленость баренцевоморской водной массы также увеличивается с 32,61 ‰ до 32,78 ‰, промежуточной водной массы Горла – с 31,24 ‰ до 31,51 ‰, поверхностной водной массы Горла – с 29,96 ‰ до 30,42 ‰, беломорской поверхностной водной массы – с 29,69 ‰ до 30,15 ‰. С уменьшением глубины разница в средних значениях солености воды растет.

Скорость изменяется следующим образом: в баренцевоморской водной массе скорость растет с -0,02 м/с до -0,03 м/с, в промежуточной водной массе Горла падает с 0,02 м/с до 0,01 м/с, в поверхностной водной массе Горла растет с 0,003 м/с до 0,01 м/с, в беломорской поверхностной водной массе остается неизменна 0,03 м/с.

В целом, в августе температура воды и солености во втором периоде (2015-2019 год) увеличиваются на всем исследуемом разрезе. Значения скорости у дна увеличиваются, на промежуточных горизонтах уменьшаются, на поверхности у западных берегов скорость растет, у восточных не подвергается изменениям.

#### 4.2.2 TS-диаграммы

Более наглядно изменение характеристик видно на двумерных диаграммах.

По исходным данным построены TS-кривые в феврале и августе, рисунок 15 и 16. На рисунках, выделены водные массы, характеристики водных масс представлены в таблицах 4 и 5.

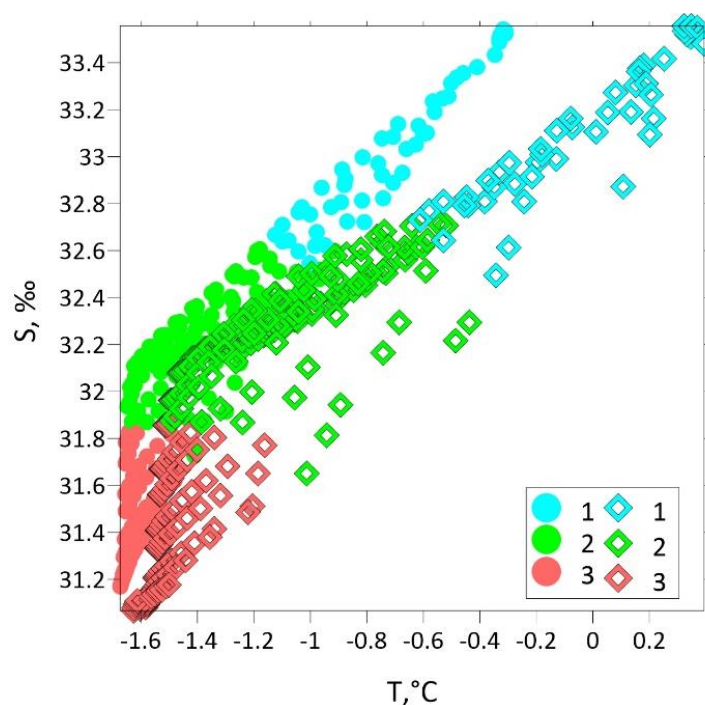


Рисунок 15 – TS-кривые в феврале за периоды 1993-1997 год (●), 2015-2019 год (◆) (Водные массы: 1 – баренцевоморская; 2 – промежуточная водная масса Горла; 3 – поверхностная водная масса Горла)

По рисунку 15, видно, что все водные массы в феврале во втором периоде (2015-2019 год) стали теплее по сравнению с первым (1993-1997 год). Максимальная температура приходится на баренцевоморскую водную массу в первый период максимум равен  $-0,31^{\circ}\text{C}$ , во втором –  $0,39^{\circ}\text{C}$ . Минимальные температуры в первом периоде приходятся на промежуточную и поверхностную водные массы Горла  $-1,41^{\circ}\text{C}$  и  $-1,62^{\circ}\text{C}$ , соответственно. Во втором периоде минимальные значения наблюдаются в поверхностной водной массе Горла –  $-1,50^{\circ}\text{C}$ .

Значения солености более сильно изменились в поверхностной водной массе Горла, в первом периоде максимальная соленость –  $32,09\text{‰}$ , минимальная –  $31,17\text{‰}$ , а во втором максимальная –  $31,86\text{‰}$ , минимальная –  $31,07\text{‰}$ . Максимальная соленость воды наблюдается в баренцевоморской водной массе в первом периоде равна  $33,54\text{‰}$ , во втором –  $33,56\text{‰}$ . Более



распресненная водная масса, это поверхностная водная масса Горла, минимальная соленость воды в первом пятилетии равна 31,17 ‰, во втором пятилетии – 31,07 ‰.

В целом, во втором периоде в феврале воды Горла Белого моря стали теплее, что отражается на графике (рисунок 15). Соленость воды у дна уменьшается, и с уменьшением глубины соленость увеличивается к поверхности (таблица 4).

Температура воды в августе во втором периоде (2015-2019 год) также стала теплее по сравнению с первым (1993-1997 год) (рисунок 16).

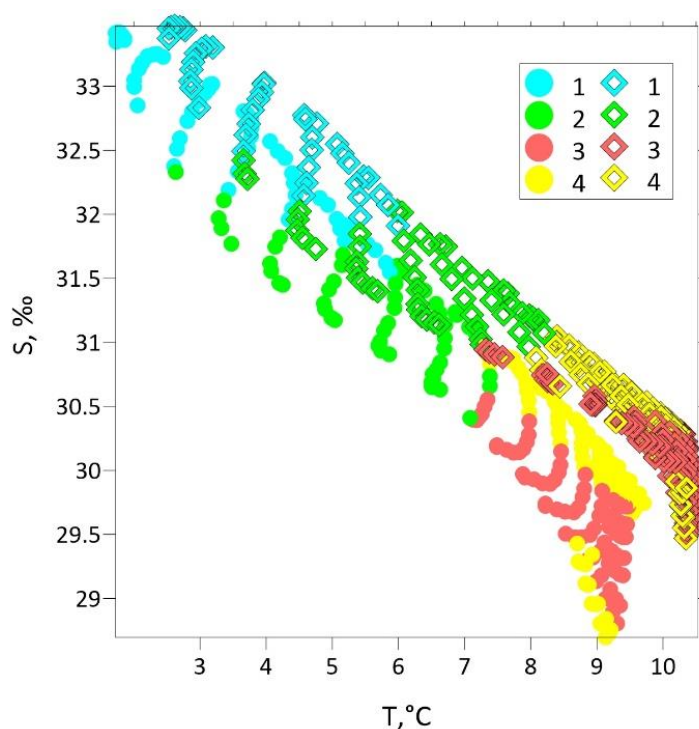


Рисунок 16 – TS-кривые в августе за периоды 1993-1997 год (●), 2015-2019 год (◆) (Водные массы: 1 – баренцевоморская; 2 – промежуточная водная масса Горла; 3 – беломорская поверхностная; 4 – поверхностная водная масса Горла)

В первый период максимальная температура приходится на поверхностную водную массу Горла и равна 9,71 °С, во втором периоде максимум приходится на беломорскую поверхностную водную массу – 10,53 °С. Минимальные температуры приходятся на баренцевоморскую водную массу и в первом – 1,72° С, и во втором периоде – 2,53° С.

Наибольшая соленость наблюдается также в баренцевоморской водной массе в первом периоде – 33,42 ‰, во втором – 33,47 ‰. А минимальная соленость в первом пятилетии приходится на поверхностную водную массу Горла – 28,70 ‰, а во втором на поверхностную беломорскую водную массу и на поверхностную водную массу Горла – 29,49 и 29,47 ‰, соответственно.

В августе во втором периоде воды Горла Белого моря также, как и в феврале стали теплее, что отражается на рисунке 16. Соленость воды на всем разрезе по сравнению с первым пятилетием увеличивается, у дна меньше примерно на 0,2 ‰, на поверхности сильнее, примерно на 0,5 ‰.

#### 4.2.3 TV-диаграммы

Чтобы оценить изменения скоростей по исходным данным построены TV – кривые для февраля и августа, рисунки 17 и 18. На рисунках, выделены водные массы, характеристики водных масс представлены в таблицах 4 и 5.

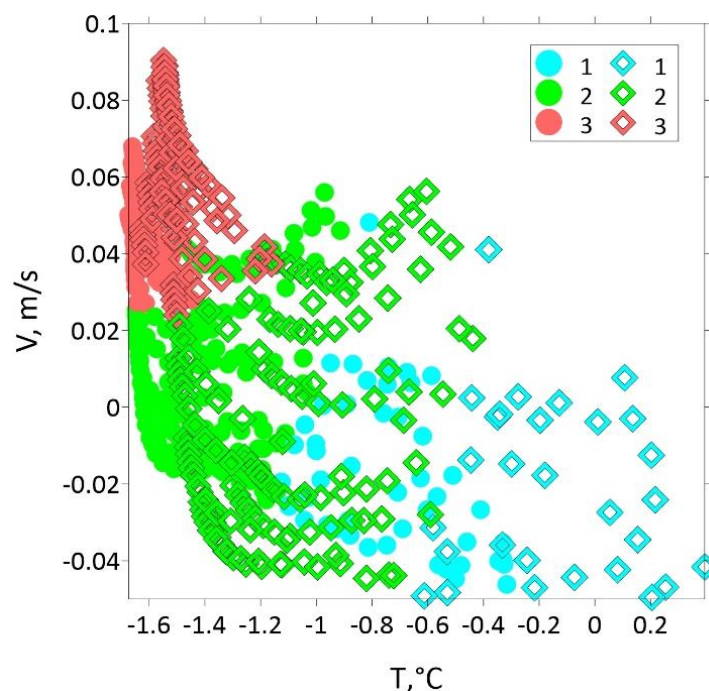


Рисунок 17 – TV-кривые в феврале за период 1993-1997 год (●), 2015-2019 год (◇) (Водные массы: 1 – баренцевоморская; 2 – промежуточная водная масса Горла; 3 – поверхностная водная масса Горла)

Как описано выше (п.4.2.2) температура воды в феврале и августе во втором периоде выше, чем в первом. В феврале минимальные значения скорости течений наблюдаются в промежуточной и поверхностной водной массе Горла: в первом периоде – -0,02 и 0,03 м/с, во втором периоде – -0,04 и 0,02 м/с (знак не учитывается, т. к. он показывает направление течения). Максимальная скорость наблюдается в беломорской поверхностной водной массе в первом периоде – 0,07 м/с, во втором – 0,09 м/с. Также высокая скорость наблюдается во втором периоде в баренцевоморской водной массе – -0,07 м/с. В феврале во втором периоде скорость течений увеличилась, относительно первого периода.

В августе скорость течений меньше, чем в феврале, минимальные значения скорости наблюдаются практически на всем разрезе Горла Белого моря, и примерно равны 0,01 м/с. Наименьшее значение имеет поверхностная

водная масса Горла 0,00 м/с. Наибольшее баренцевоморская, в первом периоде – -0,03 м/с, во втором периоде – -0,05 м/с.

В целом, и в феврале, и в августе во втором периоде, относительно первого скорость течений увеличилась.

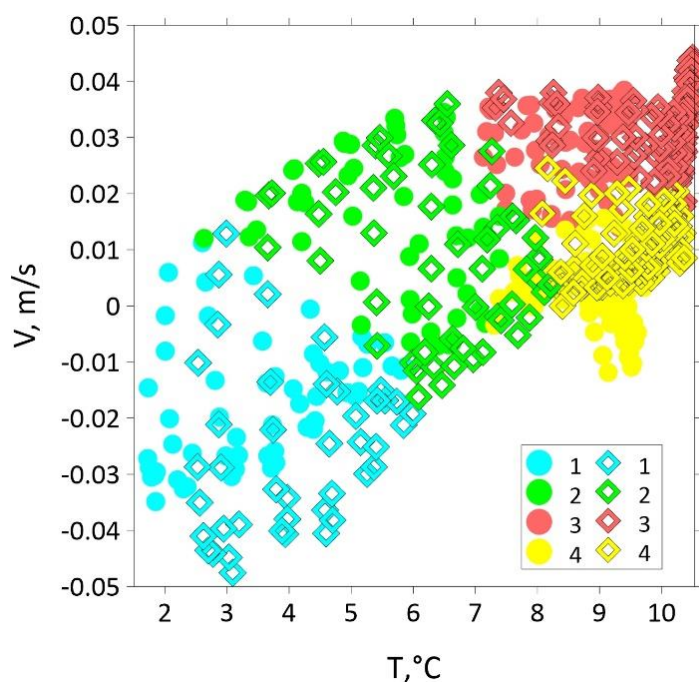


Рисунок 18 – TV-кривые в августе за период 1993-1997год (●), 2015-2019 год (◆) (Водные массы: 1 – баренцевоморская; 2 – промежуточная водная масса Горла; 3 – беломорская поверхностная; 4 – поверхностная водная масса Горла)

#### 4.2.4 Сравнение средних показателей по критерию Стьюдента

Как видно на рисунках выше, водные массы в Горле Белого моря за 20 лет изменились. Для проверки значимости изменений характеристик ВМ, проведем сравнение средних значений с помощью критерия Стьюдента. Ниже, в таблицах 6 и 7, представлена описательная статистика характеристик.

Таблица 6 – Проверка гипотезы о равенстве средних значений  $T$ ,  $S$  и  $V$  в классах в феврале за два периода 1993-1997 и 2015-2019 гг. (при  $\alpha = 0,05$ ,  $t_{кр} = 1,96$ ). Значимые различия выделены.

Период		1993-1997 год			2015-2019 год			t*
Характеристика		x <sub>ср</sub>	N	D	x <sub>ср</sub>	N	D	
Баренцевоморская водная масса	T, °C	-0,73	50	0,06	-0,07	45	0,09	<b>4,35</b>
	S, ‰	33,01	50	0,09	33,09	45	0,08	0,45
	V, м/с	-0,02	50	0,0004	-0,04	45	0,0007	<b>14,51</b>
Промежуточная водная масса Горла	T, °C	-1,41	151	0,03	-1,11	141	0,07	<b>2,83</b>
	S, ‰	32,2	151	0,03	32,27	141	0,04	0,85
	V, м/с	0,01	151	0,0004	-0,004	141	0,0008	<b>9,86</b>
Поверхностная водная масса Горла	T, °C	-1,62	95	0,002	-1,5	110	0,01	<b>11,04</b>
	S, ‰	31,49	95	0,04	31,38	110	0,06	1,12
	V, м/с	0,05	95	0,0001	0,06	110	0,0003	<b>31,82</b>
Примечание: x <sub>ср</sub> – среднее значение выборки; N – длина выборки; D – дисперсия выборки; t* - эмпирический критерий Стьюдента выборки.								

При сравнении средних характеристик за два периода (1993-1997 год и 2015-2019 год) в феврале, на всем исследуемом разрезе выявили, что различия средних значений температуры воды статистически значимы, т. к. эмпирические значения критериев Стьюдента больше критического значения ( $t_{кр} = 1,96$ , при  $\alpha = 0,05$ ): эмпирическое значение критерия Стьюдента ( $t^*$ ) в баренцевоморской водной массе – 4,35, в промежуточной водной массе Горла – 2,83 и в поверхностной водной массе Горла – 11,04. Различия средних значений скорости течений также статистически значимы: эмпирическое значение критерия Стьюдента ( $t^*$ ) в баренцевоморской водной массе – 14,51, в промежуточной водной массе Горла – 9,86 и в поверхностной водной массе Горла – 31,82. А различия средних значений солёности воды на всем исследуемом разрезе оказались статистически не значимы. В баренцевоморской водной массе эмпирическое значение критерия Стьюдента ( $t^*$ ) равно 0,45, в промежуточной водной массе Горла – 0,85 и в поверхностной водной массе Горла – 1,12.

Таблица 7 – Проверка гипотезы о равенстве средних значений  $T$ ,  $S$  и  $V$  в классах в августе за два периода 1993-1997 и 2015-2019 гг. (при  $\alpha = 0,05$ ,  $t_{кр} = 1,96$ ). Значимые различия выделены.

Период		1993-1997 год			2015-2019 год			$t^*$
Характеристика		$x_{ср}$	N	D	$x_{ср}$	N	D	
Баренцевоморская водная масса	T, °C	3,51	56	1,53	4,03	43	1,19	0,97
	S, ‰	32,61	56	0,29	32,78	43	0,22	<b>2,67</b>
	V, м/с	-0,02	56	0,00012	-0,03	43	0,00022	<b>79,78</b>
Промежуточная водная масса Горла	T, °C	5,71	54	1,48	6,41	56	1,44	0,61
	S, ‰	31,24	54	0,17	31,51	56	0,12	<b>3,95</b>
	V, м/с	0,02	54	0,00015	0,01	56	0,0002	<b>111,87</b>
Беломорская поверхностная водная масса	T, °C	8,68	76	0,48	9,89	100	0,62	1,07
	S, ‰	29,69	76	0,17	30,15	100	0,11	1,66
	V, м/с	0,029	76	0,00005	0,032	100	0,00004	<b>34,21</b>
Поверхностная водная масса Горла	T, °C	8,93	110	0,33	9,61	97	0,36	0,97
	S, ‰	29,96	110	0,28	30,42	97	0,11	1,14
	V, м/с	0,003	110	0,00004	0,01	97	0,00003	<b>116,22</b>

В августе при сравнении средних характеристик выявили, что статистическая значимость различия средних значений температуры воды изменилась. Различия в средних значениях температуры воды оказались статистически не значимы: т. к. эмпирические значения критериев Стьюдента меньше критического значения ( $t_{кр.} = 1,96$ , при  $\alpha = 0,05$ ): эмпирическое значение критерия Стьюдента ( $t^*$ ) в баренцевоморской водной массе – 0,97, в промежуточной водной массе Горла – 0,61, в беломорской поверхностной водной массе – 1,07 и в поверхностной водной массе Горла – 0,97.

Различия средних значений солености воды в баренцевоморской водной массе и промежуточной водной массе Горла оказались статистически значимы (при  $t_{кр.} = 1,96$  и  $\alpha = 0,05$ ), их эмпирические критерии Стьюдента ( $t^*$ ) равны – 2,67 и 3,95, соответственно. А различия солености в беломорской поверхностной водной массе и в поверхностной водной массе Горла статистически не значимы, их эмпирические критерии Стьюдента ( $t^*$ ) равны – 1,66 и 1,14, соответственно.

Различия средних значений скорости течений на всем исследуемом разрезе оказались статистически значимы. В баренцевоморской водной массе эмпирическое значение критерия Стьюдента ( $t^*$ ) равно 79,78, в промежуточной водной массе Горла – 111,87, в беломорской поверхностной водной массе – 34,21 и в поверхностной водной массе Горла – 116,22.

Таким образом, при сравнении средних значений выборок выявили, что средние значения температуры воды за разные периоды зимой имеют значительные различия. Зимой средняя температура воды во втором пятилетии (2015-2019 год) выше, чем в первом (1993-1997 год). Летом изменение температуры не значимо, но температура воды во втором периоде выше, чем в первом.

Средняя соленость воды ко второму периоду (2015-2019 год) зимой на глубинах увеличивается, а на поверхности уменьшается, но статистические различия в средних значениях солености воды не значимы. Летом соленость во втором периоде (2015-2019 год) выше, чем в первом, но только часть вод (баренцевоморская и промежуточная водная масса Горла) имеет значимые различия.

Различия в средних значениях скорости течений значимы и зимой, и летом. Зимой средние значения скорости течений ко второму периоду (2015-2019 год) увеличиваются у дна и на поверхности, а на промежуточных горизонтах уменьшаются. Летом ко второму периоду значения скорости у дна и на поверхности у западных берегов увеличиваются, на промежуточных горизонтах уменьшаются, а у восточных не подвергаются изменениям.

## Заключение

На основании проделанного исследования можно сделать следующие выводы.

1. По среднему многолетнему распределению гидрологических характеристик на разрезе через Горло Белого моря видно, что более холодная вода наблюдается у дна (на глубине около 50 м) между  $41^\circ$  и  $41,5^\circ$  восточной долготы и равна  $1,5^\circ\text{C}$ . Начиная с горизонта 25 м температура воды на одинаковых глубинах различается на  $0,25^\circ\text{C}$ , у западного берега выше, чем у восточного. С глубиной соленость воды растет, осолонение происходит быстрее у западных берегов, такое изменение солености прослеживается до дна.

В Горле Белого моря имеется два направления течений, т. к. через него выходят и поступают водные массы в Белое море. Смена направления течения начинается у западных берегов на  $40,5^\circ$  восточной долготы, изотаха равная нулю вертикально поднимается до поверхности, практически не изменяясь. Далее на середине разреза, кривая вновь появляется и изменяется по диагонали ко дну.

2. С помощью кластерного анализа по трем характеристикам T, S и V, можно сказать что, в Горле Белого моря в феврале выделяется 3 водных массы: баренцевоморская, промежуточная и поверхностная водная масса, а в августе выделяется 4 водные массы: к трем февральским водным массам добавляется беломорская поверхностная водная масса.

3. В 2015-2019 гг. по сравнению с 1993-1997 гг. в феврале (зимой) отмечаются статистически значимый рост температуры воды и скорости течений во всех водных массах, выделяемых на разрезе через Горло Белого моря: в баренцевоморской – на  $0,66^\circ\text{C}$  и на  $0,02\text{ м/с}$  соответственно, в промежуточной водной массе Горла –  $0,40^\circ\text{C}$  и на  $0,01\text{ м/с}$ , в поверхностной водной массе Горла –  $0,12^\circ\text{C}$  и  $0,01\text{ м/с}$ .



В августе (летом) значимые различия отмечаются только в солености и скорости движения воды. В баренцевоморской водной массе они увеличились на 0,17 ‰ и на 0,01 м/с соответственно. В промежуточной водной массе Горла соленость увеличилась на 0,27 ‰, а движение ослабло на 0,01 м/с. Поверхностная водная масса Горла и беломорская вода увеличили только свою скорость на 0,01 м/с.

Таким образом, очевидно, что к концу 2010-х годов транзит вод через Горло Белого моря увеличился в обе стороны, причем более интенсивно – в зимнее время, баренцевоморская вода, поступающая в глубоководную часть Белого моря, стала более соленая летом и более теплая зимой, а поверхностные водные массы стали теплее только в зимнее время, что, скорее всего, обусловлено общим климатическим потеплением региона.

## Список использованных источников

1. Филатов Н.Н., Тержевик А.Ю. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. С 19-22.
2. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2021. М.: Наука, 2022. С. 104-106.
3. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1982. С. 53-63.
4. Карты Белого моря. URL: <https://barenzevo.arktifiksh.com/karty-belogo-morya> (дата доступа: 15.05.2023)
5. Лоция Белого моря. Ленинград: 5-е изд. Гидрографическое управление, 1932. С 91-95.
6. Бабков А.И. Гидрология Белого моря. СПб: Зоологический институт РАН, 1998. С 10, 22.
7. Глуховский Б.Х. Гидрология и гидрохимия морей СССР. Том 2. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. С 7-9, 80-89.
8. Вайновский П.А., Малинин В.Н. Методы обработки и анализа океанологической информации. Многомерный анализ.: Учебное пособие. СПб.: РГГМИ, 1992. С 469-474.,
9. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации.: Учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2020. С 78-84, 159.