



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

Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и охраны природных вод

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему Современное состояние гидрологического и ледового
режимов Баренцева моря

Исполнитель Аксенов Петр Владимирович

Руководитель кандидат географических наук, доцент

Чанцев Валерий Юрьевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

Ерёмина Татьяна Рэмовна

« ____ » _____ 20__ г.

Санкт-Петербург

2019

Содержание

	Стр.
Сокращения	3
Введение	4-5
1 Физико-географическое описание Баренцева моря	6
1.1 Географическое положение	6
1.2 Режим атмосферной циркуляции	7
1.3 Термохалинная структура вод	8-12
1.4 Ледовый режим	12-13
2 Понятие «Атлантификация»	14-16
3 Исходные данные и методы их анализа	17
3.1 Описание исходных данных	17-18
3.2 Статистические методы анализа	18-19
4 Анализ полученных результатов	20
4.1 Временная изменчивость полей гидрологических характеристик вод Баренцева моря	20-23
4.2 Пространственная изменчивость полей температуры, солёности и ледовитости Баренцева моря	24-30
4.3 Статистический анализ временной изменчивости рядов температуры воды и ледовитости Баренцева моря и индекса АМО	31-33
Заключение	34-35
Список используемой литературы	36-37
Приложение А. Карты пространственной изменчивости полей гидрологических характеристик и ледового покрова Баренцева моря	

Сокращения

СЛО – Северный Ледовитый океан

АВ – атлантическая вода

ПТВ – потенциальная температура воды

Введение

В Арктике с каждым годом уменьшается площадь ледяного покрова. В 2002 и 2005 годах были зарегистрированы рекордные минимумы летнего ледяного покрова 5,6 и 5,4 млн км² соответственно, а в 2007 году его сокращение до 4,2 млн км² вызвало открытие Северо-Западного прохода, что говорит о беспрецедентном снижении площади покрытой льдом. В последующие годы с 2008 по 2011 года летний минимум площади ледяного покрова был несколько выше, вплоть до 2012 года, когда был зарегистрирован новый рекордный минимум составивший 3,41 млн км². Затем последовал небольшой рост площади ледяного покрова до 5,2 млн км², однако отрицательный многолетний тренд сохранился [1]. Вопрос о причинах ускоренного сокращения ледяного покрова в СЛО в последнее десятилетие остаётся дискуссионным.

Баренцево море является своеобразными «воротами» глубоководной Арктики и разделяется на две климатические зоны: северная, климат здесь определяется выносом пакового льда из Северного Ледовитого океана (СЛО), а также Арктическими воздушными массами и южная, где на климат оказывает влияние Северная Атлантика через приток вод атлантического происхождения. Это подразделение на две климатические зоны предопределяет функционирование экосистем, существование которых неразрывно связано с сезонным ледяным покровом, а также с распределением водных масс в Баренцевом море. Здесь обитают белые медведи и ластоногие, жизненные циклы которых связаны со льдом; 2017 видов рыб из которых 20 – ценные промысловые. Таким образом, изменения в термохалинном и ледовом режимах моря оказывают воздействие и на экономику региона. Помимо рыболовства на шельфе Баренцева моря занимаются добычей нефти и газа; здесь начинается самый короткий путь из Европы в Азию – Северный морской путь. Именно

поэтому изучение вопросов, связанных с изменениями гидрологического и ледового режима Баренцева моря является актуальной на сегодняшний день задачей.

Цель исследования: оценить современное состояние гидрологического (изменение притока вод атлантического происхождения) и ледового режимов Баренцева моря с 2007 по 2017 гг.

Исходя из поставленной цели были сформированы следующие задачи:

1. Изучение литературы содержащей сведения о гидрологическом и ледовом режимах Баренцева моря. Выделение факторов, оказывающих влияние на состояние ледяного покрова моря.
2. Получение исходных данных по температуре, солёности и ледовитости Баренцева моря.
3. Обработка данных реанализа MERCATOR с помощью языка программирования Python и построение карт распределения разности температуры, солёности и ледовитости, а также их статистическая обработка.
4. Обработка данных по ледовитости, температуре воды и индекса АМО и построение временных рядов, и их статистическая обработка.
5. Анализ полученных результатов

1 Физико-географическое описание Баренцева моря

1.1 Географическое описание

Баренцево море располагается на севере Европейской части России между параллелями $81^{\circ}52'$ и $66^{\circ}44'$ с.ш. и меридианами $16^{\circ}30'$ и $68^{\circ}32'$ в.д. на Северо-Европейском шельфе и имеет сообщение с Арктическим бассейном, а также с Норвежским и Гренландским морями. В этих пределах его границы проходят по следующим линиям: мыс Южный – остров Медвежий – мыс Нордкап на западе; на юге – побережье материка и линия мыс Святой Нос – мыс Канин Нос; на востоке – западное побережье острова Вайгач и Новая Земля и далее до мыса Кользат; на севере – северная окраина Земли Франца-Иосифа – мыс Мэри-Хармсурт на острове Земля Александры – через острова Виктории и Белый к мысу Ли-Смит на Шпицбергене (см. рисунок 1.1). Площадь моря составляет 1,424 млн. км², объем 316 тыс. км³, максимальная глубина 600 м, а средняя глубина 222 м [2].

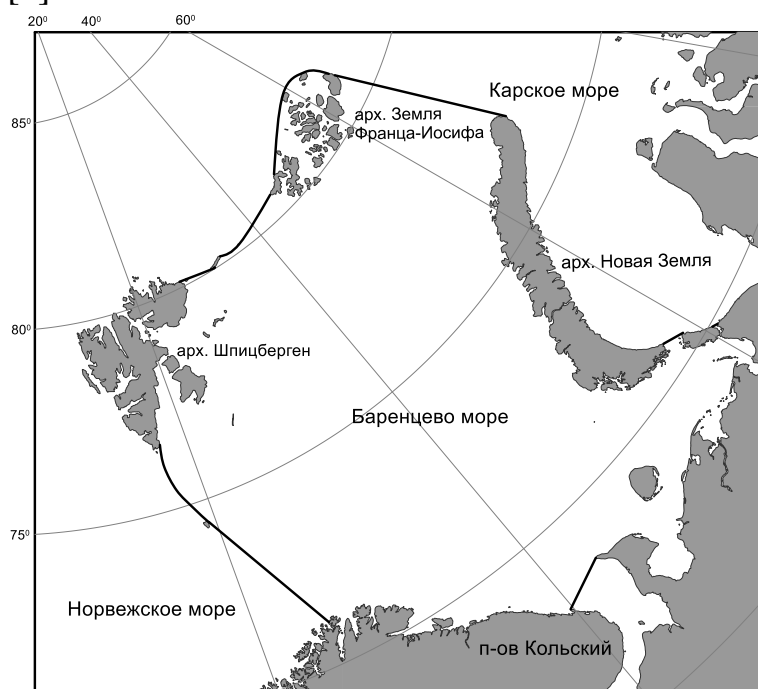


Рисунок 1.1: Границы Баренцева моря

1.2 Режим атмосферной циркуляции

На основании общепринятой климатической классификации З.М. Прик акватория Баренцева моря относится к северному и южному районам Атлантической области Арктики. Южный район характеризуется повышенной циклонической активностью, в то время, как в северном она ослаблена. В обоих районах в течение года выпадает малое количество осадков. Осенью и зимой характер атмосферной циркуляции северной Атлантики в целом определяется расположением и степенью развития Исландского минимума. Малые по размеру ледники арх. Шпицберген и Земля Франца-Иосифа тем не менее оказывают влияние на траектории движения исландских циклонов. При среднемноголетних условиях формируются две области пониженного давления: одна в центре Норвежского моря, а другая к юго-западу от о. Исландия. Формируясь здесь, циклоны движутся вдоль побережья Скандинавского п-ова в Баренцево море, где, достигнув центральной части, разворачиваются к Кольскому п-ову. Зимой в южной части акватории моря преобладают юго-западные и южные воздушные переносы, а в северной – северо-восточные. В летний сезон циклоническая деятельность ослабевает и над Баренцевым морем устанавливается однородная область повышенного давления. Траектории движения циклонов смещаются на север и проходят через арх. Земля Франца-Иосифа. В это время устойчивая система воздушных переносов не формируется [3].

1.3 Термохалинная структура вод Баренцева моря

Общее распределение поверхностной температуры воды Баренцева моря характеризуется её повышением с северо-востока на юго-запад. Такое распределение обусловлено, главным образом, поступлением теплых атлантических вод, 12 % тепла которых теряется на водообмен с окружающими морями.

Распределение поверхностной температуры в зимний сезон неоднородно и уменьшается с юга-запада на северо-восток в пределах от +4-5°C до 0-1°C соответственно. В летний сезон неоднородность сохраняется, а значения варьируются от +8-9°C на юге до -2-3°C на севере. В весенний сезон температура близка к значениям за зиму, а в осенний, наоборот – за лето.

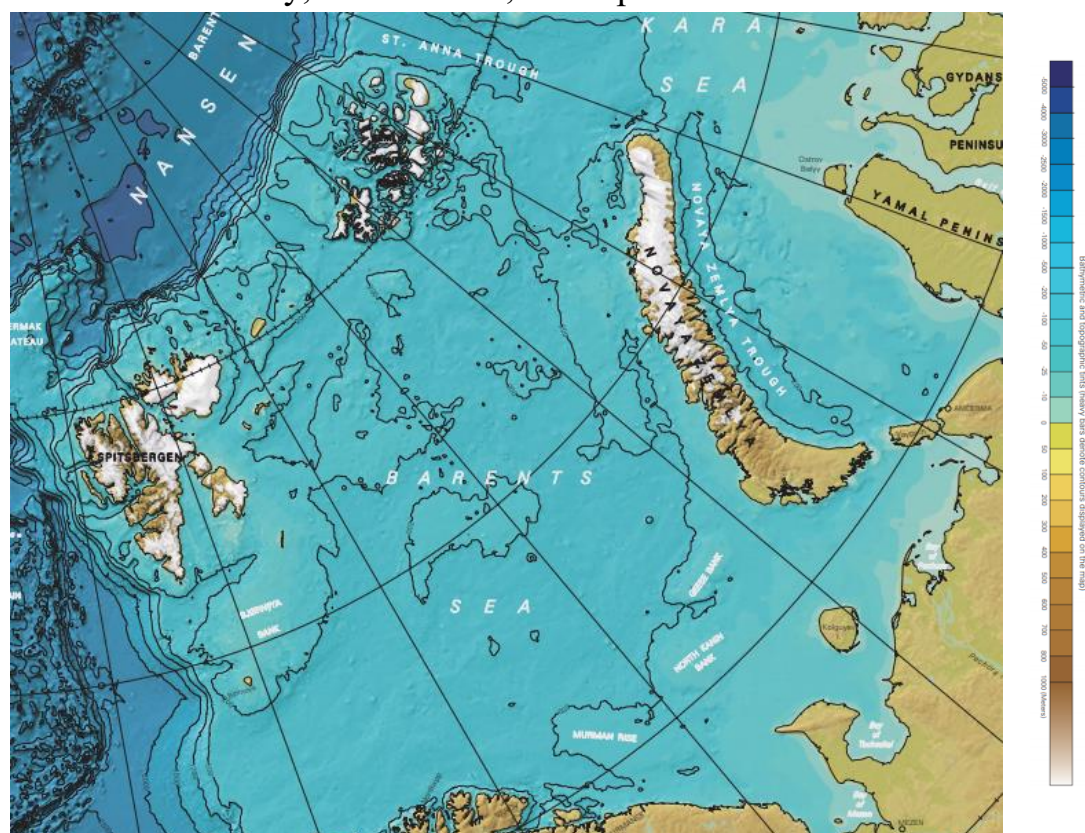


Рисунок 1.2: Батиметрическая карта Баренцева моря [4]

Вертикальное распределение температуры по большей части определяется притоком теплых атлантических вод, зимним охлаждением морской воды, а

также рельефом дна. Атлантическая вода (АВ) распространяется в Баренцевом море с запада на восток по углубления дна. В восточной части моря температура понижается до горизонта 100-150 м, а затем начинает повышаться ко дну. В северо-восточной части понижение температуры проникает до горизонта 100-200 м, далее идет повышение температуры до $+1^{\circ}\text{C}$.

В общем вертикальное распределение температуры воды в северной и северо-западной частях моря выглядит следующим образом: в летний сезон наименьшую температуру имеет поверхностный слой до 25-50 м (до $-1,5^{\circ}\text{C}$), ниже более теплый слой до 50-100 м (до -1°C), а затем идет слой, нагретый атлантической водой до $+1^{\circ}\text{C}$. Отсюда, можно выделить, что между поверхностью и теплой атлантической водой лежит высоко стратифицированный промежуточный слой до горизонта 100 м.

Рельеф дна, также сказывается на распространение атлантических вод. Подводные возвышенности являются преградой для них, поэтому эти воды их обтекают, из-за чего низкая температура воды наблюдается на приповерхностных горизонтах над возвышенностями. Ко всему прочему, здесь происходит более интенсивное охлаждение воды, чем в более глубоких районах моря, что связано с так называемым «топографическим эффектом» [5].

В юго-восточной части моря, где преобладают относительно небольшие глубины сезонные изменения температуры воды хорошо выделяются по всей толщине моря. В зимний сезон отрицательные температуры воды наблюдается от поверхности до дна. За весну-лето море прогревается на глубину до 15-20 м. В осенний сезон конвекция выравнивает температуру по вертикали.

На распределение солёности на поверхности в Баренцевом море в летний сезон главным образом оказывают влияние поступление атлантических вод, система течений, рельеф дна и процессы ледообразования. Солёность в 35‰ можно наблюдать в юго-западной части Баренцева моря, где располагается Нордкапский желоб. Здесь столь высокая солёность обусловлена притоком

атлантических вод, а также отсутствием процессов ледообразования. При продвижении на север более заметно проявляют себя процессы образования и разрушения льда, что приводит к уменьшению солёности до 34,5‰. Более распреснённые воды наблюдаются в южной и юго-восточной частях моря. Здесь солёность колеблется в пределах от 32 до 33‰ и определяется таянием льда и притоком пресной воды с суши.

В зимний сезон поверхностное распределение солёности более равномерное по всей северной и северо-западной акваториях моря и составляет 35‰. В южной и юго-восточной акваториях солёность также повышается до 32,5-33,5‰ вследствие ледообразования и усиления притока атлантических вод. В весенний сезон поверхностное распределение солёности сохраняется, однако вдоль побережья из-за усиленного таяния льдов и притока пресной воды с суши вода распресняется до 29‰ и даже до 25‰.

Вертикальное распределение солёности также неоднородно по всей акватории Баренцева моря, т.к. её определяют рельеф дна и приток вод атлантического происхождения. Диапазон изменения солёности по вертикали колеблется в пределах от 34‰ у поверхности и до 35,1‰ у дна. Над подводными возвышенностями диапазон меньше. Картина сезонных изменений солёности по вертикали выглядит следующим образом: в летний сезон поверхностный слой распреснен и с горизонтов 10-25 м начинается относительно резкое повышение солёности; в зимний сезон этот скачок менее выражен.

Следующим параметром определяющим гидрологическим режим Баренцева моря является плотность морской воды, которая зависит от температуры и солёности воды. В зимний сезон в северной части моря отмечаются наиболее плотные воды, образующиеся при сильном охлаждении и осолонении при ледообразовании. В летний сезон наиболее плотная вода наблюдается в центральной части моря, что вызвано опреснением воды на севере вследствие таяния льда, а на юге увеличенным речным стоком и повышенным прогревом воды.

С увеличением глубины увеличивается и плотность. В зимний сезон в южной и юго-восточной частях, где глубины невелики, её увеличение по вертикали невелико. В северной и северо-западной частях, увеличение плотности с глубиной значительно из-за влияния атлантической воды. В весенний и особенно в летний сезоны, вертикальная стратификация заметно выражена, а в осенний – стратификация ослаблена, вследствие вертикального перемешивания.

Развитие вертикальной термохалинной конвекции неравно от района к району вследствие их неравномерного охлаждения, сложного рельефа дна в центральной части моря, а также притока теплых атлантических вод с юго-запада и пресных речных вод с юга. На севере глубина проникновения конвекции составляет 50-75 метров, однако по причине сильной стратификации, вызванной таянием льда, она не достигает дна. На северо-востоке, севернее арх. Новая Земля конвекция может достигать 125 метров. Далее на юг, над Центральной возвышенностью, наблюдается проникновение зимней термохалинной конвекции до дна, вследствие того, что плотность воды здесь однородна по всей толще водяного столба [6]. Это проникновение вызывает образование холодных и тяжелых вод, которые стекают по склону во впадины, в том числе и в Центральную, образуя холодные придонные воды. В юго-восточной части Баренцева моря перемешивание осложняется притоком пресной воды с берега и от таяния льда, однако в осенне-зимний сезон, когда происходит интенсивное охлаждение поверхности моря термохалинная конвекция проникает до дна.

В Баренцевом море выделяются четыре основные водные массы: поверхностные Арктические воды, приходящие с севера, имеют низкую соленость и температуру; поверхностные Атлантические, приносимые Нордкапским течением и глубинные приходящие с севера, обладают повышенной температурой и соленостью; Прибрежные воды, образованные материковым стоком, приходящие из Белого и Норвежского морей в летний сезон теплые и малосоленые, в зимний – холодные и солёные; Баренцевоморские

воды, сформированные в результате перемешивания вышеперечисленных водных масс, обладают высокой солёностью и низкой температурой. В зимний сезон юго-западная часть моря по всей толщине водной колонны заполнена Атлантической водной массой, а северо-восточная – Баренцевоморскими водами. Прибрежные воды прослеживаются только в поверхностном слое. Арктическая водная масса в это время на акватории Баренцева моря отсутствует, так как интенсивное перемешивание трансформирует её в Баренцевоморскую. В летний сезон южная часть Баренцева моря заполнена Прибрежной водной массой, при этом здесь, у дна, наблюдаются воды атлантического происхождения. В центральной части располагается Атлантическая водная масса, а на севере – поверхностная Арктическая и глубинная Баренцевоморская [2].

1.4 Ледовый режим Баренцева моря

Баренцево море практически никогда не замерзает полностью. В его западной части кромка льдов обычно не опускается ниже 72° с.ш. Ледовый сезон в отличие от других арктических морей менее продолжительный. Такие ледовые условия обусловлены влиянием крупномасштабных воздействий теплых АВ и переносов воздушных масс из Северной Атлантики. В среднем, в зимний период (март-апрель) акватория покрыта льдом на 55-60%. В более теплые годы ледовитость составляет 30-35%, в экстремально холодные 85-90% от площади моря. В летний сезон средняя ледовитость Баренцева моря составляет 5-10%. В более теплые года море полностью освобождается ото льда, а в холодные 20-25% площади акватории покрыта льдом. Отсутствие льда в юго-западной части моря поддерживается в течение года притоком теплых АВ, которые компенсируют радиационное выхолаживание и адвекцию холода воздушными массами, что

препятствует ледообразованию. Обратная картина наблюдается в северной и северо-восточной частях Баренцева моря, где отсутствует проникновение к поверхности притока АВ вследствие устойчивого галоклина. Такая выраженная стратификация поддерживается поступлением льда из Арктического бассейна. Дальнейшие потери тепла вследствие отрицательного радиационного баланса приводят к выхолаживанию, благоприятствующему образованию льда [3, 7].

2 Понятие «Атлантификация»

Первое упоминание термина «Атлантификация» встречается в [8]. Он использовался для того, чтобы дать объяснение смене вертикальной структуры в центральной части Баренцева моря. Далее этот термин можно встретить в исследовании [9]. Здесь авторы его применяют уже относительно всего моря и определяют его как возрастание притока АВ, которое приводит к сокращению ледяного покрова Баренцева моря. Поток атлантической воды не постоянен и имеет сезонную изменчивость: в зимний сезон, когда над Норвежским морем проходит множество циклонов, объем поступающей в Баренцево море АВ увеличивается, в летнее же время, когда циклоническая активность снижается, происходит уменьшение притока. Однако юго-западная часть Баренцева моря не единственный источник поступления теплых и солёных атлантических вод.

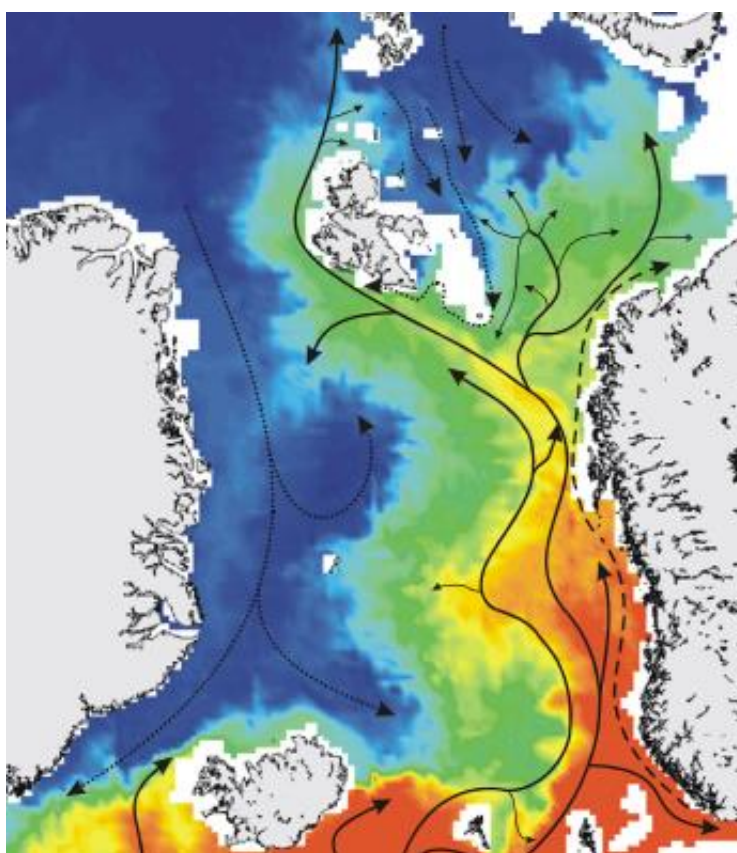


Рисунок 2.1: Карта распространения АВ на глубине 100 м. Сплошные стрелочки – атлантические воды, пунктирные – арктические воды [10]

Более трансформированные, но всё ещё сохраняющие присущие АВ характеристики они проникают в Баренцево море в виде глубинных течений через северную между арх. Шпицберген и Земля Франца-Иосифа и северо-восточную границы через пролив Святой Анны к берегам арх. Новая Земля [10]. В рамках данного исследования был сделан упор на изучения притока вод атлантического происхождения как наиболее вероятной причины изменения термохалинной структуры и ледового режима Баренцева моря.

Схематически атлантификация выглядит следующим образом:

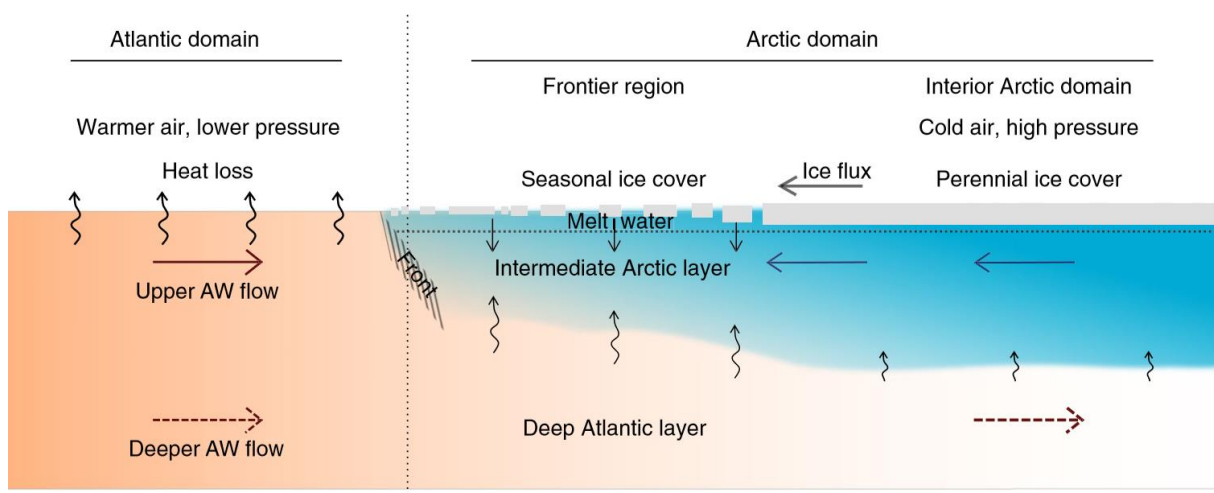


Рисунок 2.2: Схематичное изображение процесса «Атлантификации» [7]

Красным цветом на рисунке изображена АВ, которая характеризуется повышенной температурой и солёностью; синий цвет отображает Арктическую водную массу – более холодную и распресненную из-за притока льда. Горизонтальные и вертикальные стрелки показывают потоки тепла и соли. Как видно, в левой части водная колонка достаточно хорошо перемешана, в то время как в правой части наблюдается стратификация. Также, на рисунке представлена фронтальная зона, где встречаются два типа водных масс. Здесь наблюдаются самые большие вертикальные потоки тепла и соли, так как стратификация более слабая, а АВ более солёная и теплая в сравнении с арктической водой. В северной части Баренцева моря (правая часть рисунка) необходимым условием поддержания стратификации является внос льда из Арктики, – источник пресной воды. Если количество пресной воды уменьшается, происходит разрушение

пикноклина во фронтальном регионе, что делает возможным переход к субарктическому климату [7]. Этот рисунок изображает приток АВ с юга на север, т.е. Нордкапское течение. Воды атлантического происхождения, которые подходят с северо-востока располагаются на глубине, однако, как следует из [6] вертикальная конвекция в осенне-зимний сезон имеет возможность достигать глубин залегания ядра АВ, поднимать её к поверхности, тем самым отсрочивая ледообразование в осенний сезон и даже подтапливая лёд зимой. В самой северной же части, между арх. Шпицберген и Земля Франца-Иосифа вертикальная термохалинная конвекция не развивается настолько сильно, вероятно по причине усиления выноса пакового льда из СЛЮ в Баренцево море. Под воздействием постепенного сокращения объема морского льда в 1990-2000-е гг. вертикальная стратификация вод моря подверглась изменениям, которые оказали положительное воздействие на потенциальную возможность проникновения вертикальной термохалинной конвекции до теплого и солёного слоя АВ. Дальнейшее расходование тепло- и солезапаса этого слоя на прогрев и осолонение расположенных выше вод приводит к более длительному сохранению обширных областей открытой воды в зимний сезон. Таким образом, можно сказать, что «Атлантификация» ведет к дальнейшему сокращению площади ледяного покрова, а также способствует трансформации гидрологической структуры Баренцева моря к субарктическому типу вдоль траектории распространения АВ [10].

3 Исходные данные и методы их анализа

3.1 Описание исходных данных

Для исследования изменений в термохалинной структуре и ледовитости вод Баренцева моря были использованы данные по температуре, солёности и ледовитости полученные из системы океанского реанализа MERCATOR с шагом по пространству $1/12^\circ$. Данный реанализ основан на вычислительной системе NEMO версии 3.2. Модель ассимилирует данные альтиметрии, температуры поверхности моря, вертикальных профилей температуры/солёности и концентрации льда, используя алгоритм фильтрации Калмана. Включен режим ассимиляции данных для температуры поверхности моря превышающий -1°C , т.к. при более низкой температуре относительный вклад данных наблюдений стремится к нулю при достижении температуры $-1,7^\circ \text{C}$. Этот вариант подразумевает, что поверхность моря покрыта льдом. Расчёт параметров происходит в сумме на 50 горизонтах, причем в верхнем стометровом слое на 22-х, где вертикальное разрешение составляет 1 м у поверхности и 450 м на глубинных горизонтах. Также, в модельные расчеты входят результаты из модели динамики и термодинамики морского льда LIM2 [6].

В качестве натуральных данных, используемых для проверки полученных результатов была выбрана температура на разрезе «Кольский меридиан» осредненная на горизонте от 0 до 200 метров за период с 1951 по 2017 гг. [11]. Разрез «Кольский меридиан» выполняется с 1900 года на меридиане $33^\circ 30'$ в.д. и является одним из самых продолжительных океанографических наблюдений, где проводятся регулярные измерения характеристик состояния морских вод. Данный разрез представляет интерес для моего исследования тем, что пересекает

потоки АВ, которые переносятся Нордкапским течением. Станции располагаются на широтах с 69°30' по 74°00' с.ш. через 30' [12].

Для оценки изменений ледяного покрова Баренцева моря были использованы данные по ледовитости из Отдела ледового режима и прогнозов ФГБУ «ААНИИ». Они представляют из себя ряд среднегодовых значений ледовитости Баренцева моря за период с 1951 по 2017 гг. [13]

Индекс Североатлантического колебания или Atlantic Multidecadal Oscillation (АМО) – долгопериодные изменения температуры поверхности океана в северной части Атлантики. У него выделяют теплые и холодные фазы, продолжительностью 20-40 лет [14]. В данном исследовании мы используем этот индекс в качестве индикатора изменений температуры воды в Баренцевом море. Данные были взяты из интернет-источника Национального управления океанических и атмосферных исследований NOAA [15].

3.2 Статистические методы анализа

Для проверки взаимосвязи изменений гидрологического и ледового режимов Баренцева моря был использован коэффициент корреляции. Этот коэффициент (r) характеризует степень тесноты линейной зависимости. Линейная зависимость двух переменных показывает, что при возрастании/убывании одной, другая также возрастает/убывает. Существует три вида характера связи двух переменных: $r > 0$, $r=0$ и $r < 0$. Если $r > 0$, то говорят об прямой зависимости, т.е. при увеличении одной переменной, увеличивается и другая, а если $r < 0$, то зависимость обратная, а если $r=0$, то между переменными отсутствует статистическая связь.

Формула для расчёта коэффициента корреляции:

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

где x_{1i} и x_{2i} – значения первой и второй переменной соответственно, \bar{x}_1 и \bar{x}_2 – их средние значения соответственно, σ_1 и σ_2 – их стандартные отклонения, N – длина рядов первой и второй переменных [16].

4 Анализ результатов

4.1 Временная изменчивость полей гидрологических характеристик вод Баренцева моря

Как было описано в главе 1, между температурой АВ и её солёностью существует прямая зависимость, следовательно, отсюда мы можем проследить как изменяется приток вод атлантического происхождения в Баренцево море. Для того чтобы выяснить на какой глубине залегает АВ в летний и зимний сезоны были построены графики изменения коэффициента корреляции в течение исследуемого периода с 2007 по 2017 гг. Так как в рамках данной работы выясняется, как усиление притока АВ влияет на гидрологические условия Баренцева моря, акватория была разбита на два района (см. рисунок 4.1), где происходит вток вод атлантического происхождения.

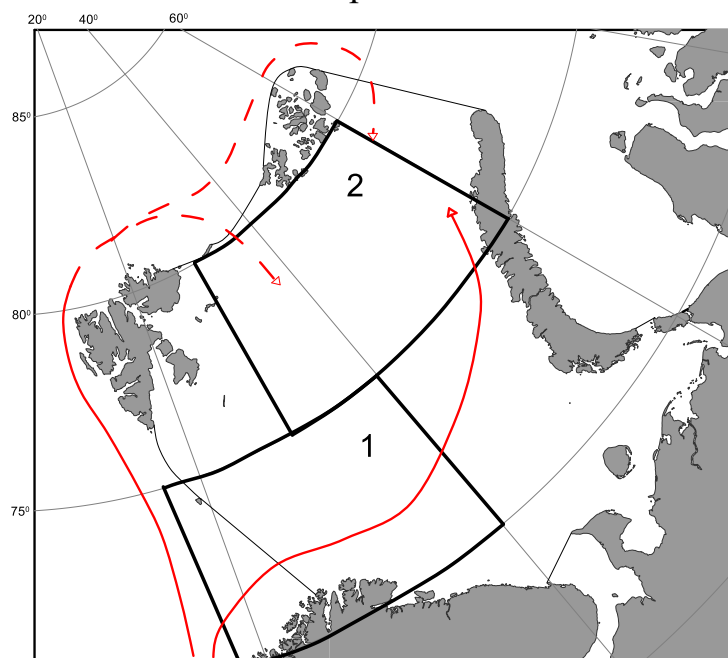


Рисунок 4.1 Схематическая карта распространения теплой АВ: красные сплошные линии – поверхностные теплые течения, красные пунктирные – теплые глубинные

Рассмотрим первые графики временного хода изменения коэффициента корреляции между температурой и солёностью АВ.

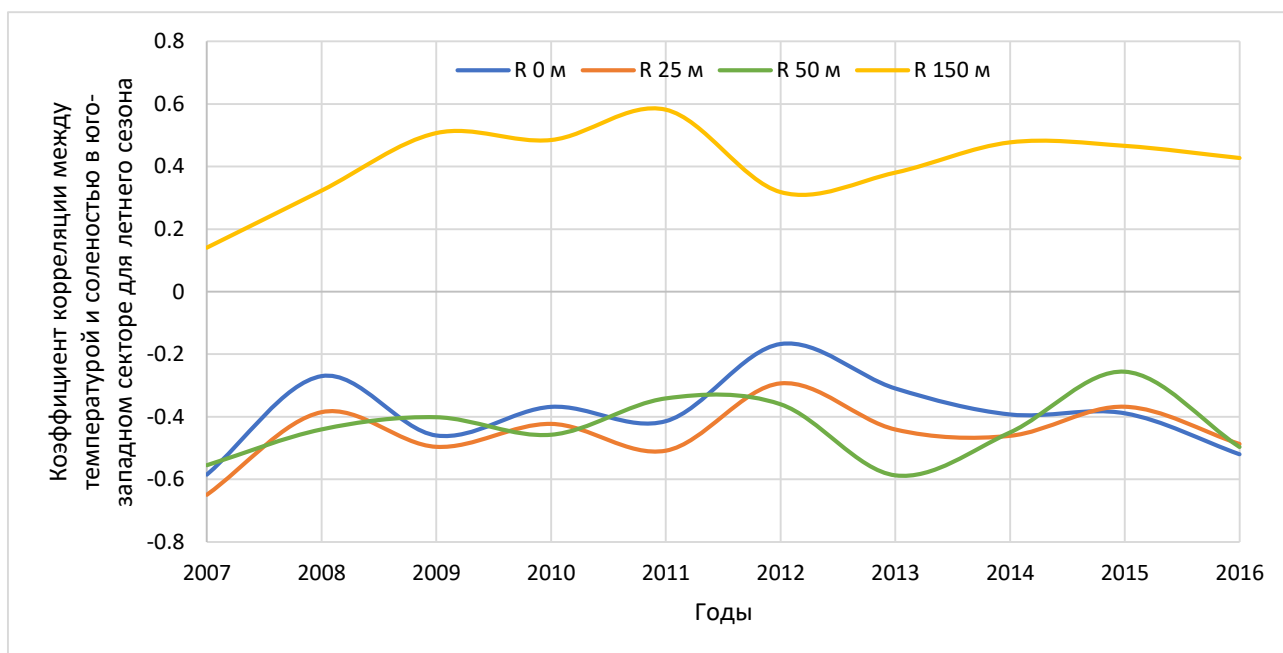


Рисунок 4.2: Временной ход изменения коэффициента корреляции между температурой и солёностью АВ для летнего сезона в юго-западном районе

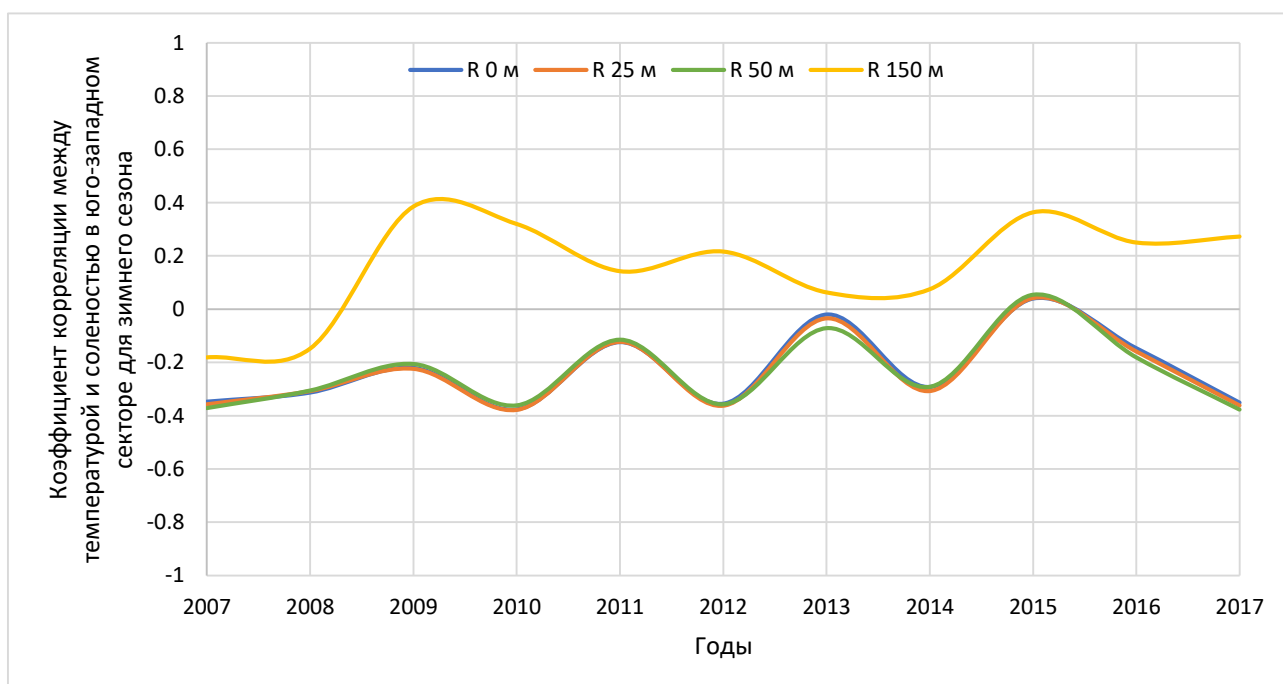


Рисунок 4.3: Временной ход изменения коэффициента корреляции между температурой и солёностью АВ для зимнего сезона в юго-западном районе

Как видно из рисунка 4.2 и 4.3 положительный коэффициент корреляции наблюдается только на глубине 150 метров как в летний, так и в зимний сезоны.

На остальных горизонтах отмечается обратная связь, т.е. с увеличением температуры происходит уменьшение солёности и наоборот, а это противоречит гидрологическим особенностям атлантической водной массы. Также стоит отметить, что в летний сезон коэффициент корреляции на горизонте 150 м несколько выше, чем в зимний, что подтверждается сезонным изменением притока АВ. От 0 до 50 метров в летний сезон наблюдаются расхождения во временном ходе коэффициентов корреляции, что вызвано, вероятно, увеличенным притоком в этот район пресной воды с материка. В зимний сезон эти расхождения практически отсутствуют, однако коэффициенты всё равно отрицательны. С наибольшей долей вероятности это происходит, главным образом, из-за интенсивной зимней конвекции и частично из-за притока пресной воды с осадками.

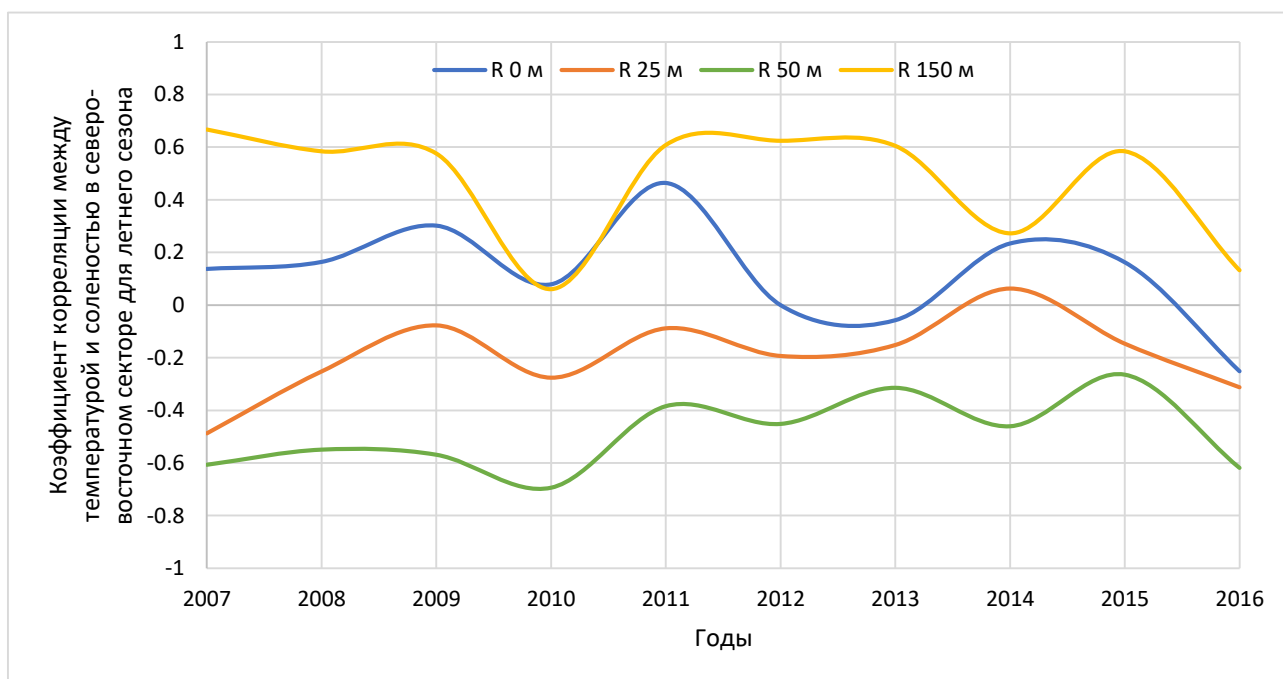


Рисунок 4.4: Временной ход изменения коэффициента корреляции между температурой и солёностью АВ для летнего сезона в северо-восточном районе

Рисунки 4.4 и 4.5 представляют собой временной ход изменения коэффициента корреляции в северо-восточном районе. Здесь, как и в случае для юго-восточного района наблюдается высокая положительная корреляция между

температурой и солёностью только на глубине 150 м. – глубина залегания ядра атлантической воды в этом районе. В летний сезон наблюдается сильное различие между коэффициентами корреляции на глубинах от 0 до 50 метров, что связано, вероятно с распреснением верхнего слоя таянием льда и поступлением пресной воды с поверхностными течениями. Зимой коэффициенты корреляции на этих горизонтах практически совпадают, что можно объяснить достаточно хорошо развитой зимней термической конвекцией. Следует отметить, что в летний сезон наблюдается резкое падение коэффициента корреляции в 2010 г. и чуть менее заметное в 2014 г. В рамках данной работы, не представляется возможным сделать однозначные выводы о природе этих «провалов» и изучение этого вопроса требует дополнительных исследований.

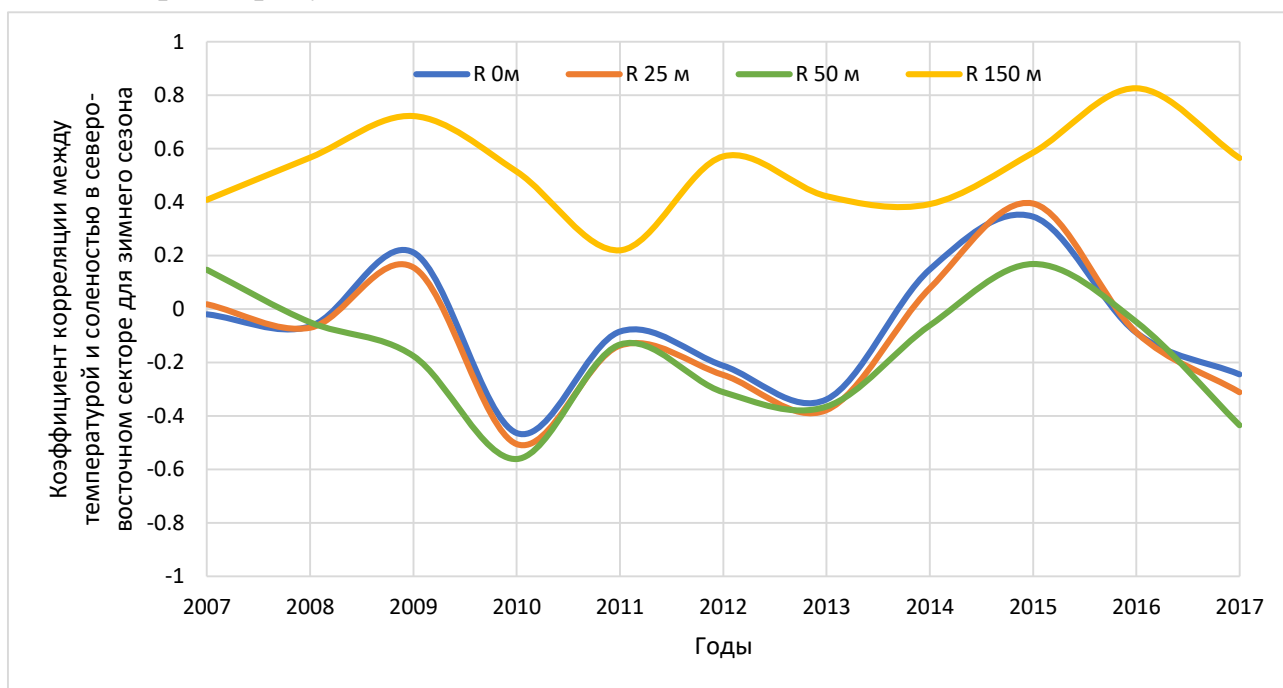


Рисунок 4.5: Временной ход изменения коэффициента корреляции между температурой и солёностью АВ для летнего сезона в северо-восточном районе

4.2 Пространственная изменчивость температуры, солёности и ледовитости Баренцева моря

Были построены карты распределения разницы потенциальной температуры воды Баренцева моря по данным реанализа МЕРКАТОР. Разница между температурой настоящего и предыдущего года была использована для более наглядных изменений в термической структуре вод Баренцева моря. Для сравнения карт они были собраны в наборы по годам на одном горизонте, которые представлены в приложении 1.

Как было показано выше, горизонт 150 метров для обоих выделенных районов Баренцева моря наиболее хорошо отображает изменения притока вод атлантического происхождения, т.к. этот горизонт наиболее изолирован от атмосферных воздействий. Были построены карты распределения разницы ПТВ на горизонте 150 метров для летнего и зимнего сезона. Сначала рассмотрим летний сезон. Для разницы 2008-2007 гг. хорошо видно, что ПТВ в 2008 году была ниже, чем в 2007, т.к. она снизилась на $0,5^{\circ}\text{C}$ в юго-восточном районе Баренцева моря. Незначительные увеличения температуры воды (до $0,5^{\circ}\text{C}$) наблюдаются в южной части северо-восточного района моря, у берегов арх. Новая Земля. Карты 2009-2008 гг. показывают увеличение температуры в районе №1, а также в самой северной части района №2 вплоть до $1,7^{\circ}\text{C}$. Снижение температуры до $0,7^{\circ}\text{C}$ наблюдается в северной и южной частях обоих выделяемых районов от 73° до 77° с.ш. В 2010-2009 гг. на всей акватории моря наблюдается незначительное снижение ПТВ на $0,2^{\circ}\text{C}$. Небольшие положительные аномалии можно наблюдать вдоль 80-ой параллели на севере и в центре Баренцева моря. Карты для 2011-2010 гг. иллюстрируют в целом повышение температуры воды на горизонте 150 метров на всей акватории на $0,5-1,2^{\circ}\text{C}$, за исключением юго-восточной части района №1 и северной части района

№2, где можно выделить снижение до $1,0^{\circ}\text{C}$. Более интересная картина наблюдается в 2012-2011 гг. т.к. в 2012 году произошло значительное повышение ПТВ, что привело к повышению температуры на всей акватории Баренцева моря вплоть до $2,2^{\circ}\text{C}$. 2013 год выдался менее теплым, относительно 2012-го, поэтому мы наблюдаем некоторое снижение температуры воды до $0,7^{\circ}\text{C}$ по всей акватории и до $1,7^{\circ}\text{C}$ в центральной части. В 2014-2013 гг. западная часть района 1 и северная часть района 2 испытали снижение температуры ещё на $1,2^{\circ}\text{C}$, в то время как в восточной части района 1 ПТВ повысилась с максимумом в $1,7^{\circ}\text{C}$. Для 2015-2014 гг. можно также выделить, что в 2015 г. температура воды была выше, чем в 2014 на всей акватории Баренцева моря. Наибольшие увеличения температуры наблюдаются на западной границе, также в северной части моря, где отмечается максимум $2,2^{\circ}\text{C}$. Однако в самой восточной части юго-западного района можно выделить область, где происходило небольшое уменьшение температуры до $0,5^{\circ}\text{C}$. В 2016-2015 гг. на большей части акватории наблюдается повышение ПТВ с максимумами в $2,7^{\circ}\text{C}$ в южной и северо-западных частях моря. В центре северо-восточного и в западной части юго-восточного районов отмечается снижение температуры до $0,5^{\circ}\text{C}$.

Для зимнего сезона карты распределения разницы ПТВ на горизонте 150 метров более интересны, т.к. в зимний сезон предполагается усиление притока вод атлантического происхождения. В 2008-2007 гг. примерно на 90% акватории Баренцева моря наблюдается увеличение температуры воды, которое особенно сильно проявляется у западного побережья арх. Новая земля. Здесь можно отметить максимум в $1,7^{\circ}\text{C}$. Для 2009-2008 гг. складывается обратная ситуация – на большей части моря произошло снижение ПТВ и особенно сильно (до $0,9^{\circ}\text{C}$) в центральной части. Также, можно отметить небольшие очаги увеличения температуры на $0,5^{\circ}\text{C}$ на западной границе района 1 и в северной части района 2. На картах для 2010-2009 гг. наблюдается увеличение температуры воды практически на всей акватории юго-западного, а также северной части северо-восточного районов моря до $1,2^{\circ}\text{C}$. На остальной части акватории уменьшение

ПТВ до $0,9^{\circ}\text{C}$. В 2011-2010 гг. 2011 год был холоднее, поэтому можно наблюдать, что произошло уменьшение температуры воды на всей акватории с минимумами в $1,7^{\circ}\text{C}$ в северо-западной части моря. Следует отметить небольшие очаги повышения температуры у берегов арх. Новая Земля, а также в центральной части района 2 Баренцева моря. В зимний сезон в 2012 году наблюдалось существенное повышение температуры воды по сравнению с 2011 г., что повлекло за собой увеличение ПТВ на всей акватории моря на $2,0^{\circ}\text{C}$ в северо-западной части и $\sim 1,5^{\circ}\text{C}$ для всего моря. В 2013-2012 гг. произошло снижение температуры воды во всех частях моря до $1,2^{\circ}\text{C}$ в центральной, кроме юго-восточной, где можно отметить незначительную прибавку к температуре в $0,5^{\circ}\text{C}$. Для 2014-2013 гг. характерно увеличение ПТВ практически на всей акватории юго-западного, и уменьшение её в северной части северо-восточного районов до $1,7^{\circ}\text{C}$. В 2015-2014 гг. на всей акватории моря нельзя выделить четкого изменения, однако наибольшее увеличение следует отметить на северо-западе с максимумом в $2,2^{\circ}\text{C}$ и наибольшее уменьшение в юго-восточной части района 1 с минимумом в $1,7^{\circ}\text{C}$. Карты распределения ПТВ для разниц 2016-2015 и 2017-2016 похожи между собой и на обоих наблюдается увеличение температуры на $\sim 1,5^{\circ}\text{C}$ и $\sim 2,0^{\circ}\text{C}$ соответственно на всей акватории Баренцева моря. Стоит отметить, что на карте 2017-2016 отмечается очаг уменьшения температуры воды на северо-западе района 2 с минимумом в $1,7^{\circ}\text{C}$.

В целом для всех карт распределения разницы температуры воды на горизонте 150 метров в летний и зимний сезоны можно отметить, что эти изменения связаны с изменением притока АВ, которое подтверждается из данных наблюдений из разреза «Кольский меридиан».

Теперь перейдем к картам распределения разности солёности на горизонте 150 метров. Как следует из Рисунков 4.2 и 4.3 изменение солёности в районах один и два зависит напрямую от изменения температуры, т.е. наблюдается повышенная положительная корреляция. На картах распределения разности солёности в летний сезон для 2008-2007 гг. можно выделить, что для района №1

заметно уменьшение солёности в южной части района порядка 0,17‰. В районе №2, а конкретно в его восточной части отмечается небольшой прирост солёности до 0,2‰. На остальной части акватории моря солёность практически не изменилась. Для карт 2009-2008 гг. наблюдается обратная ситуация – в юго-западном районе, вдоль побережья присутствует прирост солёности на 0,07‰. А в северо-восточном районе, в его западной части можно выделить снижение солёности на те же 0,07‰. Практически такая же ситуация наблюдается для разницы 2010-2009 гг. Небольшие изменения начинаются с 2011-2010 гг., когда в районе №2, в центральной и юго-восточной частях можно выделить увеличение солёности, достигающее 0,2‰ у берегов арх. Новая Земля. В 2012-2011 гг. изменения солёности наблюдаются только в южной части района №1, где происходит уменьшение до 0,23‰ и в северо-западной части района №2 – отмечается увеличение до 0,26‰. Для 2013-2012 гг. карты распределения разности солёности практически совпадают, за тем лишь исключением, что площадь отмеченных выше изменений стали меньше. 2014-2013 гг. не представляет особого интереса, т.к. изменения на всей акватории достигают лишь 0,05‰ в северной части моря увеличение, а в восточной уменьшение. Большой интерес вызывают карты распределения разности солёности для 2015-2014 гг. Здесь, снова в южной части района №1 можно увидеть, что произошло уменьшение солёности до 0,15‰, а в северной части района №2 – увеличение до 0,15‰. Для 2016-2015 гг. можно выделить увеличение солёности в южной части юго-западного района до 0,2‰, а также снижение в большей части северо-восточного района Баренцева моря.

Теперь рассмотрим карты распределения разности солёности для горизонта 150 м. в зимний сезон. Как известно, в зимний сезон происходит увеличение притока АВ в Баренцево море, а также в этот сезон активно развивается термохалинная конвекция, которая на большей части моря достигает дна. Для разницы 20080-2007 гг.: в районе №1, в центральной части наблюдается область снижения солёности до 0,075‰, в южной части района №2 наоборот –

увеличение до 0,075‰. Также эта область увеличения солёности занимает почти всю восточную часть Баренцева моря. В 2009-2008 гг. происходит обратная ситуация – там, где наблюдалось увеличение солёности, там происходит снижение и наоборот, а величина изменений сохраняется. 2010-2009 гг. чуть более интересные – увеличение солёности до 0,075‰ наблюдается в западной и юго-восточной частях района №1. А в районе №2 в западной части можно выделить небольшую область снижения солёности до 0,075‰. Немного большие уменьшения солёности наблюдаются в северо-восточной части Баренцева моря, у берегов арх. Шпицберген. Для 2011-2010 гг. выделяется достаточно сильное уменьшение солёности (до 0,3‰) в северо-западной части района №2. В районе №1 можно также отметить снижение в самой юго-западной части у западной границы того же порядка. Так же, в этом районе необходимо выделить 2 зоны увеличения солёности в северной части района и в юго-восточной, но уже порядка 0,075‰. В 2012-2011 гг. наибольший интерес вызывает увеличение солёности на всей акватории северо-восточного района в диапазоне от 0,075 до 0,3‰. Для карт 2013-2012 гг. можно выделить небольшой очаг увеличения солёности (до 0,2‰) в юго-западной части района №1. Район №2 в свою очередь в центральной части с запада на восток испытывает снижение солёности до 0,075‰. В 2014-2013 гг. происходит обратная ситуация. Для разницы 2015-2014 гг. выделяется снижение солёности в юго-западном районе вдоль материка до 0,12‰. В северо-восточном районе в его северо-западной части отмечается увеличение до 0,15‰. Обратная ситуация снова наблюдается для карт распределения солёности за 2016-2015 гг. В 2017-2016 гг. необходимо отметить, что вся западная часть района №1 покрывается областью увеличения солёности до 0,25‰ у берега. Район №2 в северной части испытывает незначительное снижение до 0,075‰.

Карты распределения разности ледовитости для зимы и лета

Далее рассмотрим карты распределения разности ледовитости на акватории Баренцева моря построенные по данным реанализа МЕРКАТОР. Для

летнего сезона, характерно распределение льдов только в северной части моря выше 77-ой параллели, между арх. Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Для разницы в 2008-2007 гг. заметно увеличение ледовитости в северо-восточной части моря, у берегов арх. Шпицберген, достигающее 65%. Также, стоит отметить, что на восточной границе, севернее арх. Земля Франца-Иосифа присутствует область где произошло уменьшение ледовитости, но менее значительное, всего около 15%. В 2009-2008 гг. произошло уменьшение ледовитости в северной части вплоть до 47% и в то же время на восточной границе наблюдается рост в 20%. Далее, в 2010-2009 гг. только в северо-западной части заметно снижение ледовитости еще на 45%, и присутствует прирост на восточной границе, но уже до 25%. В 2011-2010 гг. наблюдается небольшой рост на западе и убывание на востоке, порядка 15-20%. Для карт разности 2012-2011 характерно уменьшение ледовитости порядка 25% только в западной части. В 2013-2012 гг. практически никаких изменений не наблюдается. Однако для 2014-2013 заметно достаточно большое увеличение ледовитости с максимумом в самой северной части до 80%. А в 2015-2014 – наоборот значительное снижение (до 75% в северной части). Так же можно отметить незначительный рост ледовитости у юго-восточного побережья арх. Шпицберген, порядка 20%. Для 2016-2015 гг. присутствует небольшое уменьшение ледовитости на восточной границе до 15%.

Для зимнего сезона характерно распределение ледовитости в северной, восточной и юго-восточной частях Баренцева моря. Остальная акватория обычно свободна ото льда, вследствие развитой термохалинной конвекции и притока АВ. Рассмотрим карты распределения разности ледовитости для зимнего сезона. В 2008-2007 гг. можно наблюдать, что на севере, в центральной части, а также у восточной границы моря происходит прирост ледовитости до 25%. Снижение этой характеристики отмечается у восточного побережья арх. Шпицберген, а также у западного побережья арх. Новая Земля, где располагается минимальное значение в 45%. Для 2009-2008 гг. характерно прирост ледовитости по всей

территории, где располагаются льды. Это увеличение составляет максимально 40% в центральной части на севере. Далее в 2010-2009 гг. на севере можно отметить уменьшение ледовитости до 35% на западе, одновременно с приростом льда вдоль арх. Новая Земля, а также на юго-востоке с максимальным значением в 45%. Для 2011-2010 гг. наблюдается обратная ситуация, а именно на севере происходит рост ледовитости, особенно в центральной части (до 45%). Там, же где в предыдущую разницу отмечался прирост теперь убывание ледовитости с минимальным значением в 40%. Для зимнего сезона 2012-2011 гг. характерно мощное уменьшение ледовитости по всей занимаемой льдом акватории с минимум в западной части на севере до 80%. А для 2013-2012 гг. заметно увеличение ледовитости, но не столь высокое, около 30% в той же западной части. Для карт 2014-2013 гг. характерно незначительные изменения ледовитости: в центральной части на севере уменьшение до 25%, на самом севере и на востоке моря увеличение, до 20%. В 2015-2014 гг. снова наблюдается серьёзный прирост ледовитости (до 50%), однако он локализован только в северной части акватории. В юго-восточной происходит небольшое уменьшение значения до 15%. Для карт распределения ледовитости 2016-2015 снова выделяется значительное снижение ледовитости по всей акватории, с минимум в северной части до 70%. В 2017-2016 гг. можно наблюдать дальнейшее уменьшение ледовитости, но локализованное в самой северной части. Здесь значения доходят до -80%.

4.3 Статистический анализ временной изменчивости рядов температуры воды и ледовитости Баренцева моря и индекса АМО

Были построены среднегодовые графики временного хода температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» осредненные на горизонте 0-200 метров, ледовитости на всей акватории Баренцева моря, а также индекса атлантического мультideкадного колебания (АМО) для того, чтобы проследить как изменяется приток атлантической воды в Баренцево море, а также как эти изменения сказываются на ледовитости. Был выбран временной отрезок с 1979 года – начала спутниковых наблюдений за льдом.

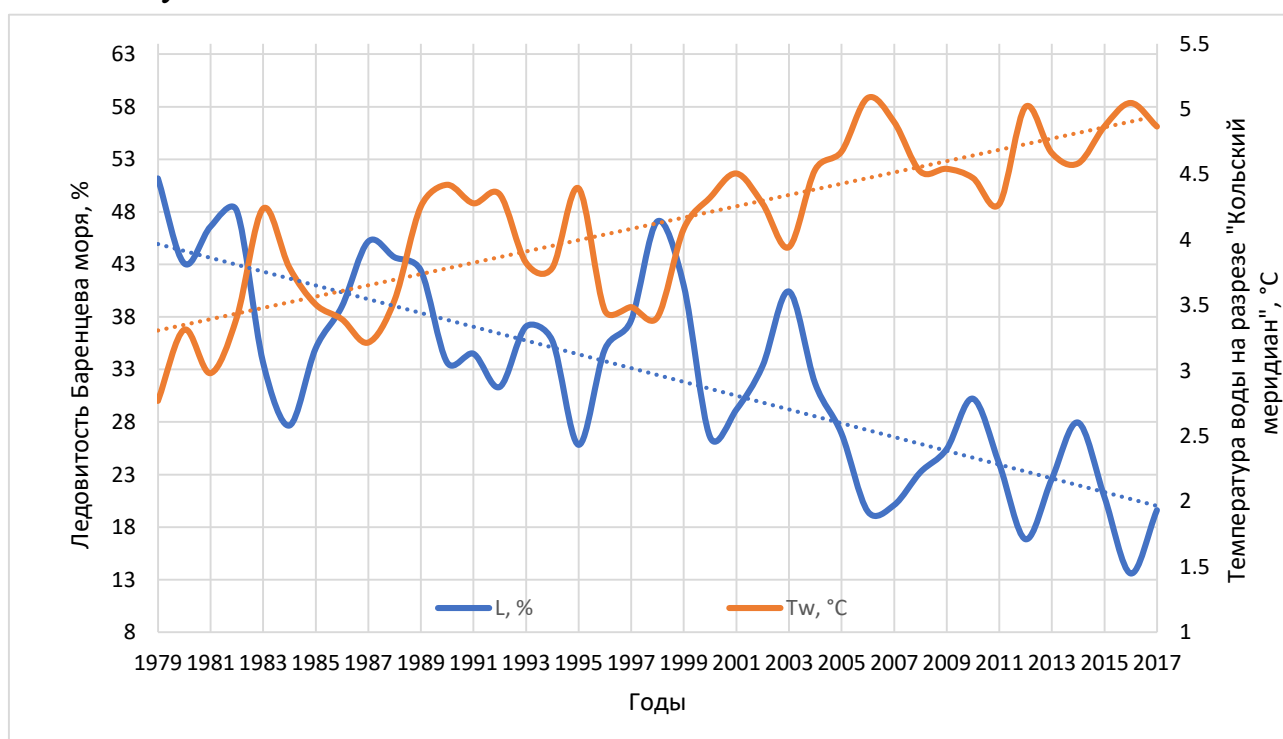


Рисунок 4.6: Временной ход температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и ледовитости Баренцева моря

Визуально, на рисунке 4.6 хорошо прослеживается положительный тренд для температуры воды и отрицательный – для ледовитости. Также, стоит отметить что значения ледовитости и температуры находятся в противофазе относительно друг друга без сдвига по времени, а это значит, что увеличение

притока АВ, который в свою очередь приносит соль и тепло в Баренцево море, отрицательно сказывается на ледовитости. Коэффициент корреляции для этих параметров составляет -0,85.

Таблица 4.1: Основные характеристики линейного тренда среднегодовых рядов температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и ледовитости Баренцева моря

Характеристика линейного тренда	Температура воды на разрезе «Кольский меридиан»	Ледовитость Баренцева моря
Коэффициент детерминации	0,64	0,61
Величина тренда	1,05°C/10 лет	-2,2%/10 лет

Как и любое другое течение у притока вод атлантического происхождения есть фазы, когда он ослабевает или наоборот увеличивается, однако, как было показано в [10] у него есть положительный тренд. Следовательно, можно утверждать, что на повышение температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» является индикатором изменения притока АВ.

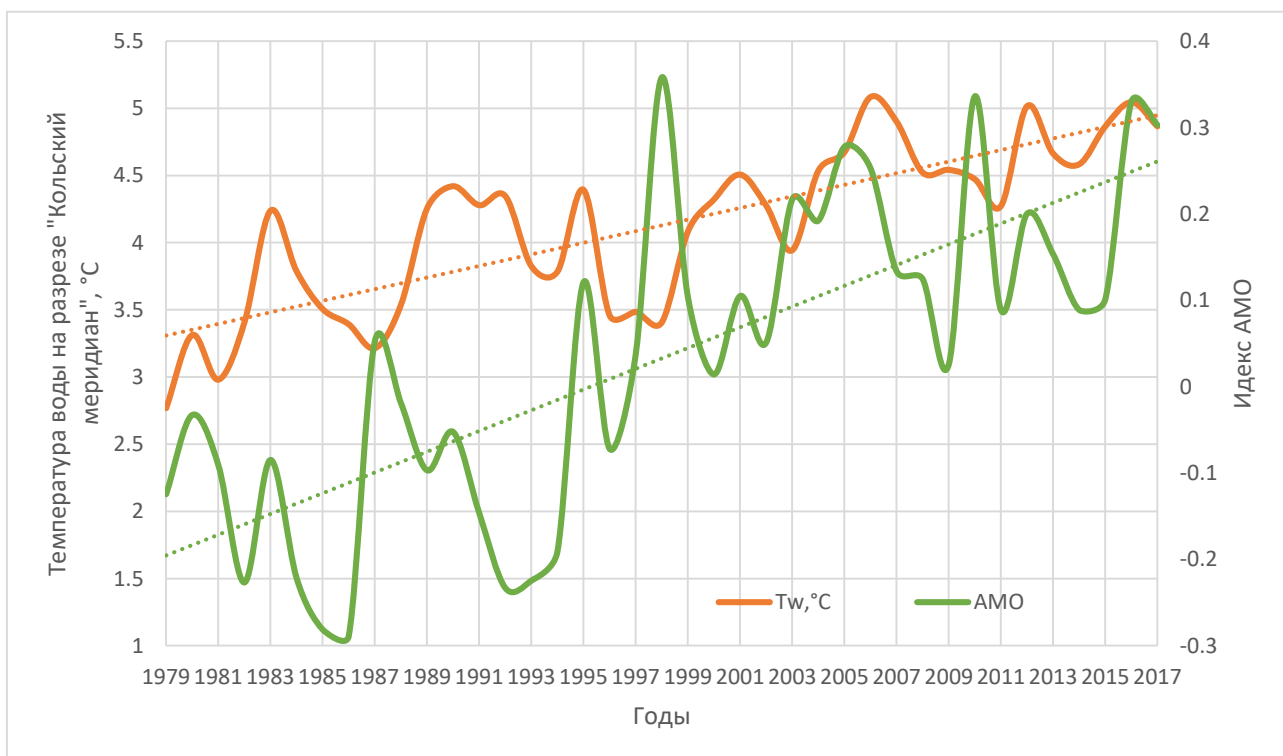


Рисунок 4.7: Временной ход температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и индекса АМО

В качестве показателя колебаний температуры воды в Баренцевом море был использован индекс Североатлантической осцилляции (АМО). Коэффициент корреляции для временного хода температуры воды и индекса АМО составляет 0,55. Индекс Североатлантической осцилляции в данный момент находится в так называемой «положительной» фазе, т.е. температура поверхности океана в северной части Атлантики повышается. Переход от одной фазы к другой занимает около 65-70 лет. Поскольку АМО находится в «положительной» фазе с 1994 года, то ещё в течение примерно 45 лет будет происходить увеличение притока АВ в Баренцево море, что в конечном счёте приведет к переходу ледового режима моря из морей Арктики в моря Атлантики – т.е. климат будет определяться изменениями в Атлантическом океане.

Заключение

В рамках данного исследования была поставлена цель оценить современное состояние гидрологического и ледового режимов Баренцева моря с 2007 по 2017 гг. Для выполнения этой задачи были отобраны среднемесячные данные по температуре, солёности и ледовитости моря за исследуемый период из базы данных океанского реанализа MERCATOR. Среднемесячные данные были разбиты на сезоны летний и зимний (июль-октябрь и декабрь-апрель соответственно) и по этим сезонам были посчитаны карты разности температуры, солёности и ледовитости для акватории Баренцева моря. Также, для проверки полученных карт были использованы временные ряды температуры воды на разрезе «Кольский меридиан», ледовитости моря по данным спутниковых наблюдений и индекса Североатлантической осцилляции. Акватория Баренцева моря была разбита на два района: юго-западный и северо-восточный. Для того, чтобы использовать данные по распределению солёности был проведен корреляционный анализ связи температуры и солёности, который показал высокие значения корреляции только на глубине 150 метров в обоих районах, причем в северо-восточном наблюдалось падение коэффициента корреляции в 2010 и 2014 гг. в летний сезон, однако в рамках данного исследования объяснения данной аномалии не выявлено. Построенные ряды временного хода температуры воды, ледовитости и индекса АМО показали, что у температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» осредненной на горизонте 0-200 метров наблюдается значимый положительный тренд, а у ледовитости – значимый отрицательный. Причем коэффициент корреляции между температурой воды и ледовитостью составил $-0,84$, а визуально по графикам можно сказать, что значения температуры и ледовитости находятся в противофазе относительно друг друга. Эти факты говорят о том, что на ледовитость Баренцева моря оказывает прямое воздействие увеличение притока

АВ. Совместный график АМО и температуры воды показал, что у обоих параметров присутствует положительный значимый тренд. А поскольку индекс Североатлантической осцилляции находится с 1994 года в «положительной» фазе, был сделан вывод, что в ближайшие годы будет происходить дальнейшее усиление притока вод атлантического происхождения в Баренцево море. Таким образом, можно сказать, что «Атлантификация» ведет к дальнейшему сокращению площади ледяного покрова, а также способствует трансформации гидрологической структуры Баренцева моря к субарктическому типу вдоль траектории распространения АВ.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному консультанту, доктору физико-математических наук, ведущему научному сотруднику ФБГУ «ААНИИ» Иванову Владимиру Владимировичу за помощь в написании магистерской диссертации.

Список использованной литературы

1. Обеспечение метеорологической и климатологической информацией: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: climate4you.com. – (дата обращения: 20.04.2019).
2. Добровольский, А.Д. Моря СССР / А.Д. Добровольский, Б.С. Залогин. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 192 с.
3. Миронов, Е.У. Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз / Е.У. Миронов, под ред. В.А. Спичкина. – СПб.: ААНИИ, 2004. – 319 с.
4. The international bathymetric chart of the Arctic Ocean (IBCAO): [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.gebco.net/news_and_media/version_3_ibcao_release.html. – (дата обращения: 25.05.2019).
5. Shapiro, I. April sea ice extent in the Barents Sea, 1850–2001 / I. Shapiro, R. Colony, T. Vinje // *Polar Research*. – 2003. – 22(1). – P. 5–10.
6. Аксенов, П.В. «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон / П.В. Аксенов, В.В. Иванов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. – 2018. – Т. 64. – №1. – С. 42-54.
7. Lind, S. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import / S. Lind, R.B. Ingvaldsen, T. Furevik // *Nature climate change*. – 2018. – 8.- P. 634-639.
8. Reigstad, M. Variations in hydrography, nutrients and chlorophyll a in the marginal ice-zone and the central Barents Sea / M. Reigstad at al. // *Journal of Marine Sustersms*. – 2002. – 38. – P. 9-29.

9. Arthun M. Quantifying the Influence of Atlantic Heat on Barents Sea Ice Variability and Retreat / M. Arthun et al. // *Journal of climate*. – 2012. – Vol. 25. – P. 4736-4743
10. Ingvaldsen R. Variability in the Atlantic inflow to the Barents Sea based on a one-year time series from moored current meters / R. Ingvaldsen, H. Loeng, L. Asplin // *Continental Shelf Research*. – 2002. – 22. – P. 505-519.
11. Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии ФБГНУ «ПИНРО» им. Н.М. Книповича: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pinro.ru>. – (дата обращения 15.03.2019).
12. Бойцов В.Д. Исследование изменчивости гидрофизических характеристик по наблюдениям на разрезе «Кольский меридиан» / В.Д. Бойцов и др. // *Ученые записки РГГМУ*. – №15. – 2009. – С. 135-149.
13. Единая Государственная система информации об обстановке в Мировом океане: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://portal.esimo.ru/portal>. – (дата обращения 16.03.2019).
14. National Oceanic & Atmospheric Administration: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aoml.noaa.gov>. – (дата обращения 17.04.2019).
15. National Oceanic & Atmospheric Administration: [Электронный ресурс]. – <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO>. – (дата обращения 18.03.2019)
16. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации.: Учебник. – СПб.: Изд-во РГГМУ. – 2008. - 408 с.