



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

Кафедра прикладной океанологии ЮНЕСКО-МОК и охраны природных вод

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Магистерская диссертация)
**«ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН В
ПРИПОЛЯРНЫХ МОРЯХ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ
ДАНЫМ»**

Исполнитель: Коник Александр Александрович, студент группы ПО-М17-1-8

Научный руководитель: д.г.н., профессор, Аверкиев Александр Сергеевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт-Петербург

2019

Содержание

Список сокращений.....	3
Введение.....	4
Глава I. Сведения о морфометрии дна, динамике, структуре вод и фронтальных зонах Баренцева и Карского морей.....	9
1.1. Границы и рельеф дна.....	9
1.2. Динамика и структура вод.....	14
1.3. Фронтальные зоны.....	30
Глава II. Материалы и методы.....	34
2.1. Исходные данные для изучения фронтальной динамики.....	34
2.2. Методика обработки исходных данных.....	36
Глава III. Фронтальная динамика в Баренцевом море в 2007 и 2011 годах.....	42
3.1. Изменчивость положения фронтальных разделов в теплый сезон...	42
3.2. Оценка количественных характеристик Прикромочной и Полярной фронтальных зон.....	51
Глава IV. Фронтальная динамика в Карском море в 2007 и 2011 годах....	57
4.1. Положение и динамика фронтальных разделов в теплый сезон.....	57
4.2. Оценка количественных характеристик Прикромочной и Полярной фронтальных зон.....	67
Заключение.....	73
Список литературы.....	75

Список сокращений

Рис – рисунок;

ТПМ – температура поверхности моря;

ФЗ – фронтальная зона;

ФР – фронтальный раздел;

В.Д. – восточная долгота;

С.Ш. – северная широта;

°С/км – градус Цельсия/ километр;

GradT, – градиент температуры поверхности моря

Км – километр

MS – от англ.: Microsoft;

СПбФ ИО РАН – Санкт–Петербургский филиал Института океанологии
им. П.П. Ширшова Российской академии наук;

Введение

Фронтальные зоны являются важным элементом структуры и общей циркуляции в Мировом океане, которые поддерживаются глобальным перераспределением потоков тепла и количества движения. Роль фронта и фронтальной зоны в описании общей циркуляции Мирового океана давно признано. Фронт в настоящем представлении играет важнейшую роль в масштабах передачи энергии от циркуляции всего Мирового океана до субмезомасштабных процессов. Однако, при наличии огромного количества научной литературы о данном явлении, фронтальные зоны хорошо исследованы лишь в климатическом масштабе осреднения, в то время как внутрисезонный и внутримесячный масштабы практически не изучены.

В настоящее время в Арктике происходят значительные климатические изменения, которые выражаются в сокращении многолетнего ледяного покрова, положительных аномалиях температуры воды и воздуха [1]. Все эти факторы существенно влияют на изменение положения фронтальных зон и связанных с ними фронтов. Сами же фронтальные зоны служат важным звеном в механизмах формирования климатической изменчивости океана и в цепи передачи энергии по каскаду масштабов от элементов глобальной океанической циркуляции до локальных явлений. Динамика фронтов в Арктическом регионе является определяющей в формировании и дальнейшей изменчивости процессов в атмосфере и гидросфере в целом. В связи с этим, актуальность изучения данного явления очень высока.

В литературных произведениях авторы термина «фронтальная зона», «фронт», «фронтальный раздел» используют в зависимости от собственного представления о природном явлении. К примеру, Е.И. Баранов во время описания фронтальных зон на течении Гольфстрим детектировал их с помощью понятия «водных масс» [2]. В.М.Грузинов при описании фронтальных зон климатического масштаба описывал их как явление с разными

характеристиками, проявляющимися во всей толще термоклина по предельным горизонтальным характеристикам градиента [3].

В исследовательской работе при определении данного природного явления станем опираться на описание К.Н. Фёдорова: «фронтальная зона – это такая зона в океане, где пространственные градиенты основных термодинамических и химических характеристик являются значительно выше по сравнению с их фоновым распределением. А фронтальный раздел – это поверхность внутри фронтальной зоны, совпадающая с поверхностью максимального градиента одной или нескольких характеристик (температуры, солёности, плотности, скорости и т.д.). Тогда фронт на поверхности – это след пересечения фронтального раздела со свободной поверхностью океана» [4].

В условиях последних десятилетий прослеживается значительная климатическая изменчивость в Арктике, проявляющаяся в интенсивном освобождении региона ото льда [5]. Данные климатические изменения спровоцировали масштабное изучение данного региона, в результате которого было получено множество новых данных [6,7,8], не имеющих при этом должного анализа и обобщения. В частности, изменчивость поверхностных фронтальных зон на акватории Баренцева и Карского морей в условиях сокращения ледового покрова до настоящего времени не рассматривалась.

В Баренцевом море обычно выделяется от 1 до 7 фронтальных зон [9,10,11], однако в данной работе рассматриваются только две из них: Прикромочная и Полярная.

Прикромочная фронтальная зона имеет сезонный характер и прослеживается только в тёплый период года. Эта зона начинается на севере моря в районе о. Медвежий, далее проходит в сторону архипелагов Шпицберген и Земля Франца Иосифа. Она формируется на границе значительно распреснённых и холодных морских вод, создающихся за счёт таяния арктического льда [12]. Также на формирование данной фронтальной зоны влияют Медвежинское и Восточно–Шпицбергенское течения [13].

Полярная фронтальная зона в Баренцевом море имеет климатический характер, разделяя преимущественно Атлантические и Арктические воды [12]. Она прослеживается на акватории моря постоянно, так как поддерживается основными теплыми атлантическими потоками [12,14,15]. Полярная фронтальная зона наблюдается в центральной части моря от о. Медвежий, однако, в отличие от Прикромочной фронтальной зоны, восточная часть смещена на акватории моря к юго–востоку.

В [11] приводится климатическое положения Полярной и Прикромочной фронтальных зон и их основных фронтов, а в [16] описана среднемесячная динамика фронтов, полученная преимущественно по данным контактных наблюдений. В обеих работах [11,16] по отдельным измерениям отмечается наличие значительной динамики фронтов. В последние годы отмечается уменьшение площади ледового покрова [17], свидетельствующее об интенсификации процессов взаимодействия океана и атмосферы, что должно находить свое отражении во фронтальной изменчивости. Однако, в настоящее время данные о ней отсутствуют.

В Карском море выделяют несколько фронтальных зон, как правило, имеющих сезонный характер: в районе пролива Карские ворота (за счет перемешивания баренцевоморских и карских вод) [18], фронтальная зона Ямальского течения (за счет перемешивания карских и прибрежных вод) [7], множество маркирующихся по различным гидрологическим характеристикам поверхностных фронтальных зон связанных с влиянием вод, поступающих из Оби и Енисея [19,20]. Многообразие выделенных фронтов формирует две обширные фронтальные зоны. Первая зона – Прикромочная, располагается в северной части моря, а вторая зона – Стоковая, находится в южной части моря.

Прикромочная фронтальная зона, как и все другие фронты в Карском море, является сезонной, так как прослеживается лишь в теплый период года с июля по сентябрь. Она является частью зоны, прослеживающейся в Баренцевом море вблизи арктического льда и формирующейся на периферии холодных распресненных вод за счет его таяния [11]. В образовании данной фронтальной

зоны вносит вклад течение Персея и течение Святой Анны [27]. О данной фронтальной зоне имеются лишь отрывочные сведения [28], не дающие полную и систематическую картину его изменчивости.

Стоковая фронтальная зона прослеживается только в теплый период года, так как всецело зависит от речного стока Оби и Енисея [21]. Причины её формирования приводятся в разных источниках [19,22,23]. В работе [23] представлены три основных типа распределения речного стока и, соответственно, расположения фронтальной зоны в Карском море: западный, центральный и восточный. Стоковая фронтальная зона обычно маркируется лишь по соленосным градиентам [19,22,24] или распространению хлорофилла «а» [25]. В работах [19,23] Стоковые фронты фиксируются с помощью прямых измерений температуры поверхности вод [26]. Однако обобщенных сведений об изменчивости положений и характеристиках фронтальной зоны нет в современных для Карского моря климатических условиях.

В Баренцевом и Карском морях за период 2005–2012 годов имело место высокое теплосодержание вод и малая ледовитость. При этом самым малоледовитым в этот период оказался сезон 2005, 2007, 2011, 2012 годы [29]. Это позволяет шире использовать систематически поступающие данные дистанционного зондирования, включающие сведения о температуре поверхности моря (ТПМ). Объединение данных спутникового зондирования с контактными измерениями в рамках ассимиляционных моделей [8] позволяют формировать регулярную сетку ТПМ в Арктическом регионе. Наиболее широкомасштабные исследования фронтальных зон возможно в годы с минимальным ледовым покровом. В результате уникальные условия последнего десятилетия дают возможность исследования изменчивости положений Полярной, Прикромочной и Стоковой фронтальных зон в рассматриваемых морях в условиях значительного уменьшения площади льда.

Таким образом, целью данной работы является изучение внутрисезонной и синоптической (декадной) изменчивости положения основных фронтальных зон Баренцева и Карского морей в теплый период года на основе анализа

экспериментальных данных по ТПМ, и оценка количественных характеристик фронтальных разделов в 2007 и 2011 годах.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Рассчитать поля градиентов для среднемесячных и декадных данных температуры поверхности морей (ТПМ).
2. Построить для безледного периода декадные и среднемесячные композитные карты, сочетающие распределения ТПМ и градиентов температуры.
3. Детектировать положения основных фронтальных разделов внутри фронтальных зон на основе меридиональных разрезов и рассчитать количественные характеристики изменчивости температуры в районах фронтальных зон.
4. Описать положение и динамику фронтальных разделов в теплый сезон.
5. Оценить количественные характеристики фронтальных зон разного генезиса.

Глава I. Сведения о морфометрии дна, динамике, структуре вод и фронтальных зонах Баренцева и Карского морей

1.1. Местоположение и рельеф дна

Баренцево море

В работе рассматриваются два крайне важных приполярных моря России – Баренцево и Карское. Границы данных географических объектов в целом условны и зависят от множества характеристик: гидрологических, геологических, гидрохимических и др.

Западная граница Баренцева море (рис.1) начинает проходить рядом с Норвежским морем по направлению: от южных проливов Новой Земли, далее в восточную сторону – к Карскому морю (по направлению м. Кользат – м. Желания), далее южная оконечность Шпицбергена (по направлению м. Южный), далее о. Медвежий и окончание границы около м. Нордкап.

Границей с южной стороны является направление к берегу материка и направление к Белому морю (ближе к м. Святой Нос). Северная граница имеет направление к архипелагам Земли Франца–Иосифа, далее к о. Северо-Восточная Земля, проходя через о–ва Белый и Виктория. Направление границы на юго-восток лежит через южный берег Новой Земли к Печерскому морю через о. Колгуев.

Береговая черта Баренцева моря вместе со всеми островами составляет 6645 км. Площадь Баренцева моря – 1405 тыс.км. кв, средняя глубина 200 м, максимальная – 600 м.

Граница линии берега непрямолинейна и имеет свойственные северным берегам особенности геологии: значительными каменистые берега и фьорды; некоторые участки берега относятся к разным типам морфологии. В западной

части проходит граница, характеризующаяся горным берегом Норвегии. В восточной стороне до о. Кильдин возвышенности становятся ниже. Со стороны о. Новой Земли и Горбовых островов береговая линия характеризуется незначительными возвышенностями, иногда всхолмлена. С северной стороны встречаются ледники в районе Новоземельских гор, стекающие в Баренцево море. На юго-восточном направлении береговая линия холмистая, иногда встречаются низменности.

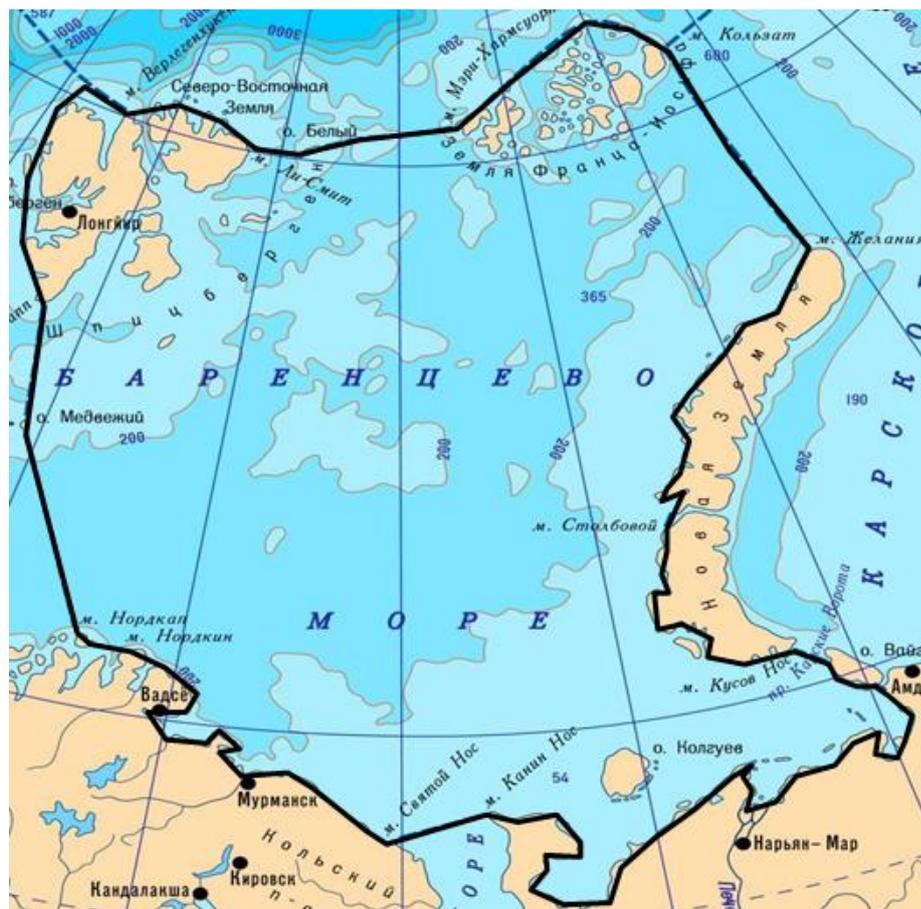


Рисунок 1. Географическая карта Баренцева моря, черной линией обозначены условные границы

В Баренцевом море в большом разнообразии встречаются острова, размещающиеся неподалеку от берега. Полученные данные о формировании побережья Баренцева моря и грунтов донных осадков, можно говорить о том, что в море ранее наблюдались значительные движения тектонического характера, изменялось положение моря и суши. Ледниковые процессы,

проходящие в Баренцевом море, также несут большую роль в формировании морского дна и рельефа моря в целом.

Представленное в работе море полностью материковое. Оно находится на шельфе Северного Ледовитого океана. В среднем глубина Баренцева моря достигает от 300 до 400 м. Ровное дно в Баренцевом море практически отсутствует: часто встречаются незначительные впадины и возвышенности морского дна. На расстоянии порядка 10 км встречаются перепады глубин до 100 м. [21].

Баренцево море характеризуется желобами (Западный, глубина 600 м, Франц – Виктория, глубина 430 м), возвышенностями (Персея, Центральная – глубина 63 м), а также пологим ровным дном (Центральное плато).

Карское море

С запада Карское море (рис.2) имеет границу до м. Желания, следом берег о. Новой Земли, ближе к западной части пролива Карские Ворота (м. Кусов Нос-м. Рогатый) и следом берег о. Вайгач к границам пролива Югорский Шар до м. Арктический (о. Комсомолец, ближе к Северной Земле). С восточной стороны граница идет в сторону берегов архипелага Северная Земля и далее к проливам Вилькицкого, Шокальского и Красной Армии. С Южной стороны граница проходит по берегу материка от м. Белый Нос до м. Прончищева.

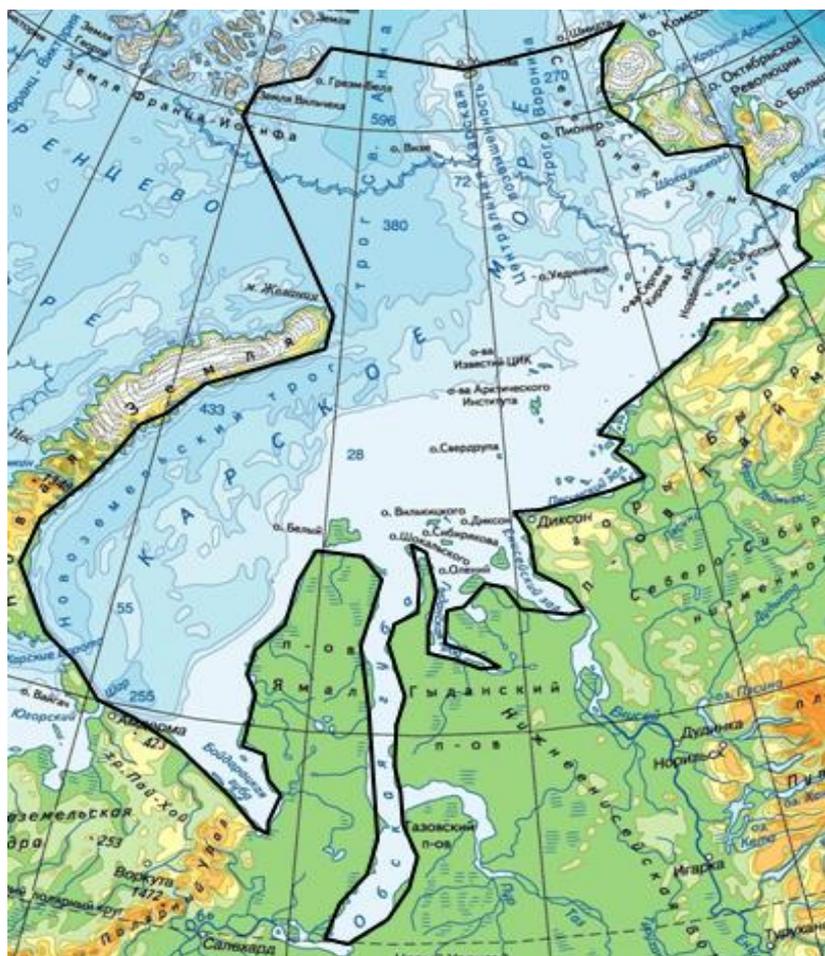


Рисунок 2. Географическая карта Карского моря, черной линией обозначены условные границы

Наибольшая глубина Карского моря составляет 620 м, средняя глубина 130 м. Общая площадь Карского моря составляет 885.2 тыс. кв. км.

Линия берега Карского моря практически не имеет ровных промежутков, так как очень извивается из-за геологических особенностей. С восточной стороны множеством фьордов изрезаны о. Новой Земли. Значительную часть береговой границы занимают Байдарацкая и Обская губы, которые сильно врезаются в материковый берег. Далее граница идет вдоль п-ва Ямал, который наоборот выдвигается в Карское море. Следом располагаются огромные по масштабам морские заливы: Пясинский, Гыданский и Енисейский. Внутри них также формируется множество незначительных по размерам заливов. Побережье архипелага Северная Земля более гладкое за счет присутствия в некоторых местах низменностей и не извилистого берега.

Дно Карского моря также изрезано впадинами и возвышенностями. Встречаются как глубоководные желоба, так и районы с незначительной глубиной. В среднем глубина Карского моря составляет 100 м, порядка 40% площади моря дно имеет глубины до 50 м [21]. Самыми мелководными частями моря являются восточная и южная, так как там присутствует множество рек. Территория со значительными глубинами наблюдается на северо-западе и западной части Карского моря. Рядом с о. Новой Земли проходит Новоземельская впадина (500 м), а далее желоб Святой Анны, который впоследствии выходит за границы Карского моря в океан. В районе архипелага Северная земля и Центральной Карской возвышенности располагается желоб Воронина (более 200 м). Центральная часть дна Карского моря ровна и неизрезанная. В северо-восточной и юго-западной частях присутствуют пороги, которые перемешиваются вместе с незначительными глубинами.

Карское море характерно наличием значительного количества островов, большинство из которых располагаются с восточной стороны. Незначительная часть островов, которые по площади являются крупными (Визе, Шмидт, Ушаков), располагаются ближе к океану.

1.2. Динамика и структура вод

Баренцево море

Баренцево море характеризуется непростой системой глубинных и поверхностных морских течений. Основное свойство данных течений – перемещение водного потока против часовой стрелки (рис.3). Таким образом данное направление течений имеет значительную реакцию на условия климата и синоптических колебаний. Течения значительно зависят от приливно-отливной динамики и от изменений плотностных градиентов, особенно в зоне слоя скачка [30].

Значительный вклад в изменчивость фронтов в Баренцевом море оказывают именно поверхностные течения. Они характеризуются локальными и постоянными, так как в целом зависят от динамики полей ветра. Приливные течения влияют на динамику изменчивости фронтальных зон незначительно.

На данный момент набора экспериментальных данных, особенно, контактных, недостаточно для того, чтобы четко определить направление течений в Баренцевом море. Поэтому практически всегда для определения направлений течений используются различные математические модели, который позволяют составить полноценную картину изменчивости полей течений.

Нордкапское течение является самым интенсивным на акватории Баренцева моря. Данное течение формирует основную климатическую фронтальную зону – Полярную. В данном регионе Нордкапское течение характеризует не только гидрологическую, но и биологическую составляющую Баренцева моря. Течение пролегает с запада на восток, разделяясь на множество малых ветвей. Основные ветви: Северная с максимальной скоростью 13 см/с, и Прибрежную с максимальной скоростью 40 см/с. Данные течения формируют две другие фронтальные зоны – Прибрежную и Полярную,

извилистым берегам Шпицбергена и далее к архипелагу Земли Франца-Иосифа. Так же стоит отметить формирование быстрого Медвежинского течения (за счет слияния с течением Персея), в результате которого максимальная скорость может достигать порядка 50 см/с.

Климатическая Полярная фронтальная зона в Баренцевом море прежде всего формируется за счет динамики теплых вод Атлантического океана, тем самым делая одним из самых теплых в Арктическом регионе Баренцево море. Теплые воды Атлантики, позволяющие сохранять положительные температуры в течение года, дают возможность большей части акватории Баренцева моря оставаться открытой от льда. На термохалинную структуру моря, за счет которой происходят большинство фронтальных зон, оказывают влияние два процесса:

1. Сезонный термоклин, который формируется за счет летнего прогрева морских вод и является важнейшим фактором формирования динамики изменчивости фронтальных зон Баренцева моря;
2. Осенне–зимняя конвекция, которая выравнивает значение градиентов изменчивости температуры по всему слою и, таким образом, не дающая возможность качественно отследить изменчивость фронтальных зон;

Важно отметить составляющую адвекции тепла Нордкапским течением, которое влияет на изменчивость фронтов в Баренцевом море. Особенно сильно адвекционная составляющая заметна в юго-западной части моря. Радиационный прогрев толщи вод в теплый сезон также оказывает значительное влияние на формирование фронтальных зон. В результате его влияния воды Баренцева моря могут прогреваться до 8°C [12].

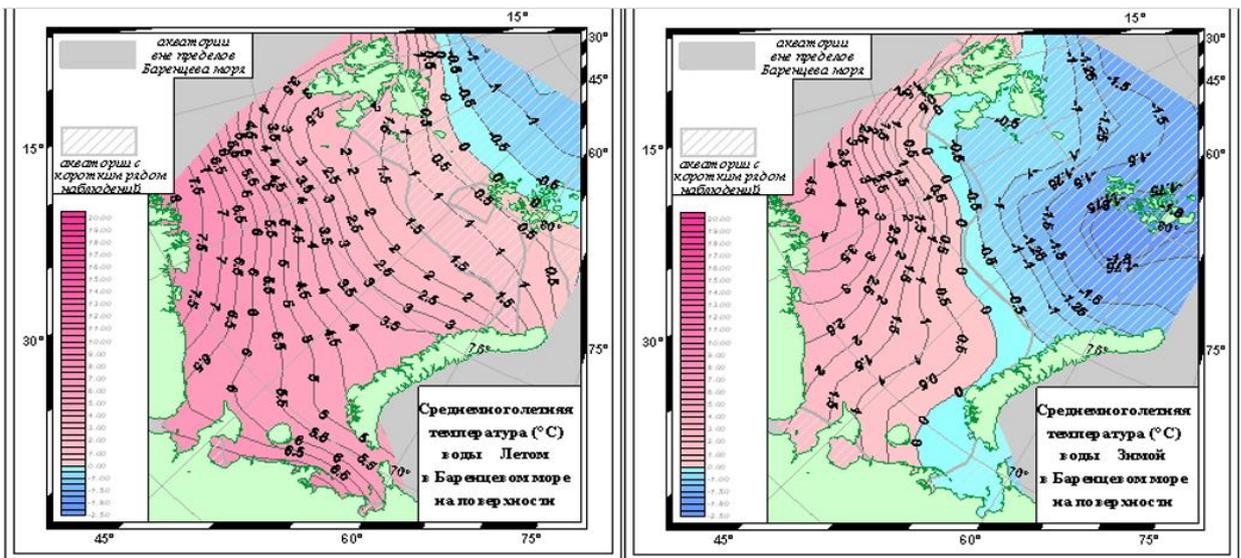


Рисунок 4. Среднеголетняя температура воды в Баренцевом море на поверхности в летний (слева) и зимний (справа) периоды [21]

Как можно видеть из рис.4, изменчивость градиентов температуры в течении сезонов незначима, при том что основой формирования фронтальных зон является большая изменчивость градиентов. В качестве примера, температура не превышает значений 5-6°C на севере моря и в его юго-западной части, до 10°C водная толща прогревается в юго-восточной части. На западе Баренцева моря температура поверхности не превышает значений 6°C, но в тоже время и не понижается до минусовых значений – максимально до 3°C. и Однако минимумы все же наблюдается особенно в отдаленных северных районах Баренцева моря, которые граничат с температурой замерзания -1.8°C .

В течении всего года на акватории моря можно зафиксировать лишь Полярную фронтальную зону, так как она имеет климатический характер. В тоже время в Баренцевом море можно зафиксировать фронтальную зону внутрисезонного характера, которую можно зафиксировать за счет изменений градиентов при таянии прикромочного льда. В результате термоклин, характеризующийся положительными значениями теплового баланса, позволяет сформироваться фронтальным зонам малого масштаба осреднения. Сложнее всего зафиксировать фронтальные зоны по картам ТПМ и градиентам

температуры, когда слой скачка находится на такой глубине, при которой поверхностное перемешивание не влияет на состояние термоклина. Данный процесс происходит в конце теплого сезона (август–сентябрь).

За счет процессов конвекции и поверхностного прогрева вод в летний сезон формируется температура нижележащих слоев, которые также влияют на формирование фронтов. Верхняя граница термоклина достигает 30 м, как и толщина квазиоднородного слоя.

Изменчивость температуры по вертикали неоднородна и зависит от множества факторов: теплых атлантических вод, зимнего охлаждения и рельефа дна [12].

В юго-западной части моря в районе начала Полярной фронтальной зоны значительное влияние на ее формирование оказывает Нордкапское течение, так как в этом районе температура остается положительной до дна и изменяется ровно и в малых пределах.

Северо-восточный район моря характеризуется наличием отрицательных температур в районе глубин 200 м. В теплый период года температура на 25 м равняется $-1,5^{\circ}\text{C}$, далее на горизонтах 50–100 м. значение температуры становится выше на $-0,5^{\circ}\text{C}$. Таким образом на горизонте от 50 до 100 метров наблюдается холодный промежуточный слой. Стоит отметить, что сильное выхолаживание из-за недостатка теплых вод наблюдается в некоторых котловинах: Новоземельский желоб, Центральная котловина.

В районе Центральной возвышенности образуется холодный промежуточный слой, не контактирующий с теплыми водами Атлантики, за счет понижения температуры в летний период на горизонтах от 50 до 100 м до минимальных значений.

Расположение и граница положительных и отрицательных температур вод на горизонтах от 10 до 25 м зависит от места на акватории моря и нахождения слоя скачка. В тоже время слой скачка распадается, и температура понижается ближе к осеннему периоду.

В результате всех перечисленных явлений на акватории Баренцева моря можно зафиксировать значительные градиенты изменчивости температуры поверхности, по которым детектируется положение фронтальных зон.

Водообмен с ближайшими акваториями, такими как Карское, Норвежское море, Северный Ледовитый и Атлантический океан, определяет значение характеристики солености в Баренцевом море так как большой объем соленостных вод превалировал над пресноводным балансом. Основное влияние на изменчивость солености в Баренцевом море оказывают Атлантические воды. По данным работы [31] расходные составляющие водообмена на северной и северо-восточной границе составляют 5–10 тыс. км³/год. Через пролив Карские Ворота водообмен в районе 20 тыс. км³/год направлен из Баренцева в Карское море через пролив Карские Ворота. Таким образом, под влиянием соленых атлантических вод, входящих с запада, находится 70% акватории исследуемого моря. В результате в центральной части моря соленость достигает 35‰, а на поверхности составляет более 34‰. В пределах 32–34 ‰ (рис.5) соленость изменяется на оставшейся акватории моря. У Горла Белого моря и рядом с материком находятся наиболее распресненные воды, которые в целом формируются за счет материкового стока. Соленость на данной акватории составляет 31–33 ‰ [21].

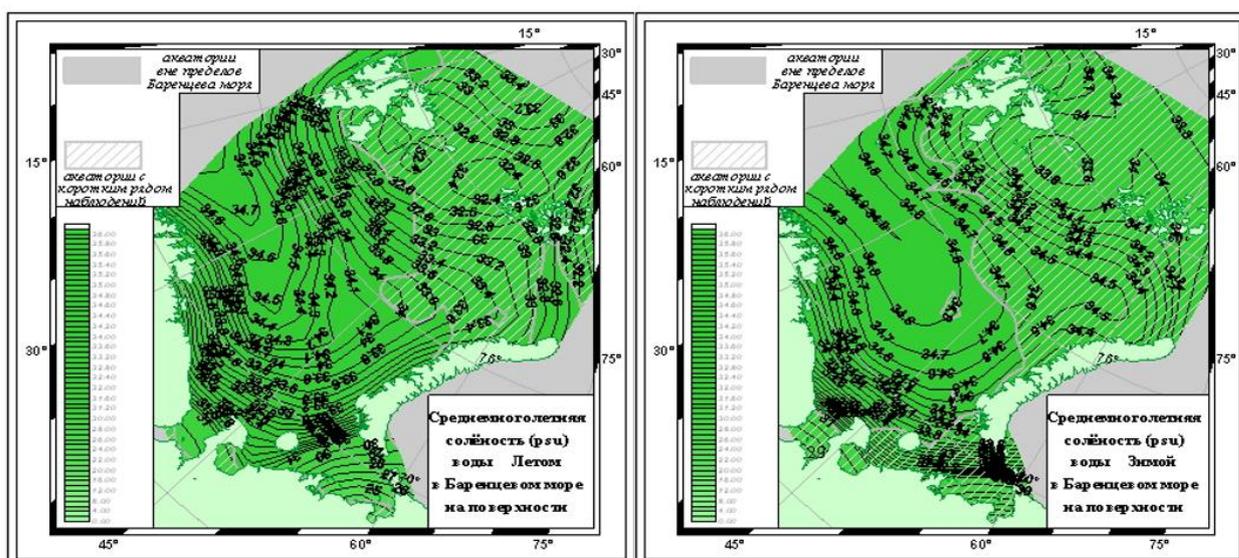


Рисунок 5. Среднегодовая соленость воды в Баренцевом море на поверхности в летний (слева) и зимний (справа) периоды [21]

Фронтальные зоны являются районами соприкосновения вод различного генезиса. В Баренцевом море структура водных масс формируется в результате взаимодействия арктических и атлантических вод. Четыре водные массы, представленные на рис.6, являются классической классификацией гидрологии Баренцева моря.

Атлантическая водная масса. Располагается в юго-западной и центральной части моря. Данная водная масса – самая устойчивая в течение всего года, так как сохраняет свои характеристики (повышенная температура и соленость). Поверхностный слой характеризуется соленостью 34.5–35.0‰ и температурами 3–5°C зимой, 8–10°C летом. Нижние горизонты до 200 м характеризуются пониженной температурой (до 3°C). Восточнее Кольского разреза температура у данной водной массы понижается до 1–3°C в поверхностном слое и до 1°C на горизонте 200 м. Стоит отметить, что данную водную массу достаточно сложно отделить от баренцевоморских вод, ввиду того, что по характеристикам она отличается незначительно. Небольшая часть атлантических вод также поступает через север Баренцева моря.

Арктическая водная масса. Располагается в районе Земли Франца Иосифа и Шпицбергена. Формируется за счет активной конвекции с баренцевоморскими водами. Из-за этого водная масса имеет схожие характеристики с баренцевоморской водной массой. Соленость в теплый период года составляет до 34‰, а зимой до 34,5‰. Температура на поверхности в летний период не превышает 1°C, далее с глубиной понижается до минимальных значений.

Прибрежная водная масса. Располагается в районе материка от Кольского п-ва до о. Новой Земли. Воды характеризуются распресненностью, наблюдаются низкие значения солености. Амплитуда годового хода

температуры значительна. Разделяет множество малых водных масс (новоземельская, беломорская, печорская и др.)

Баренцевоморская водная масса. Регистрируется в северо-восточном и северных районах Баренцева моря. Воды данной водной массы являются трансформированными атлантическими за счет слияния с атлантическими водами. В результате данного перемешивания и осенне-зимней конвекции значения солености постоянны в течении любых сезонов и колеблются незначительно: от 34,5‰ в летний период до 34,7‰ в зимний период. Значения температуры водной массы в результате конвекции и выравнивания по вертикали приближаются к отметке температуры замерзания ближе к концу теплого периода года. В середине теплого сезона отмечается устойчивый слой скачка на горизонтах от 30 до 50 м.

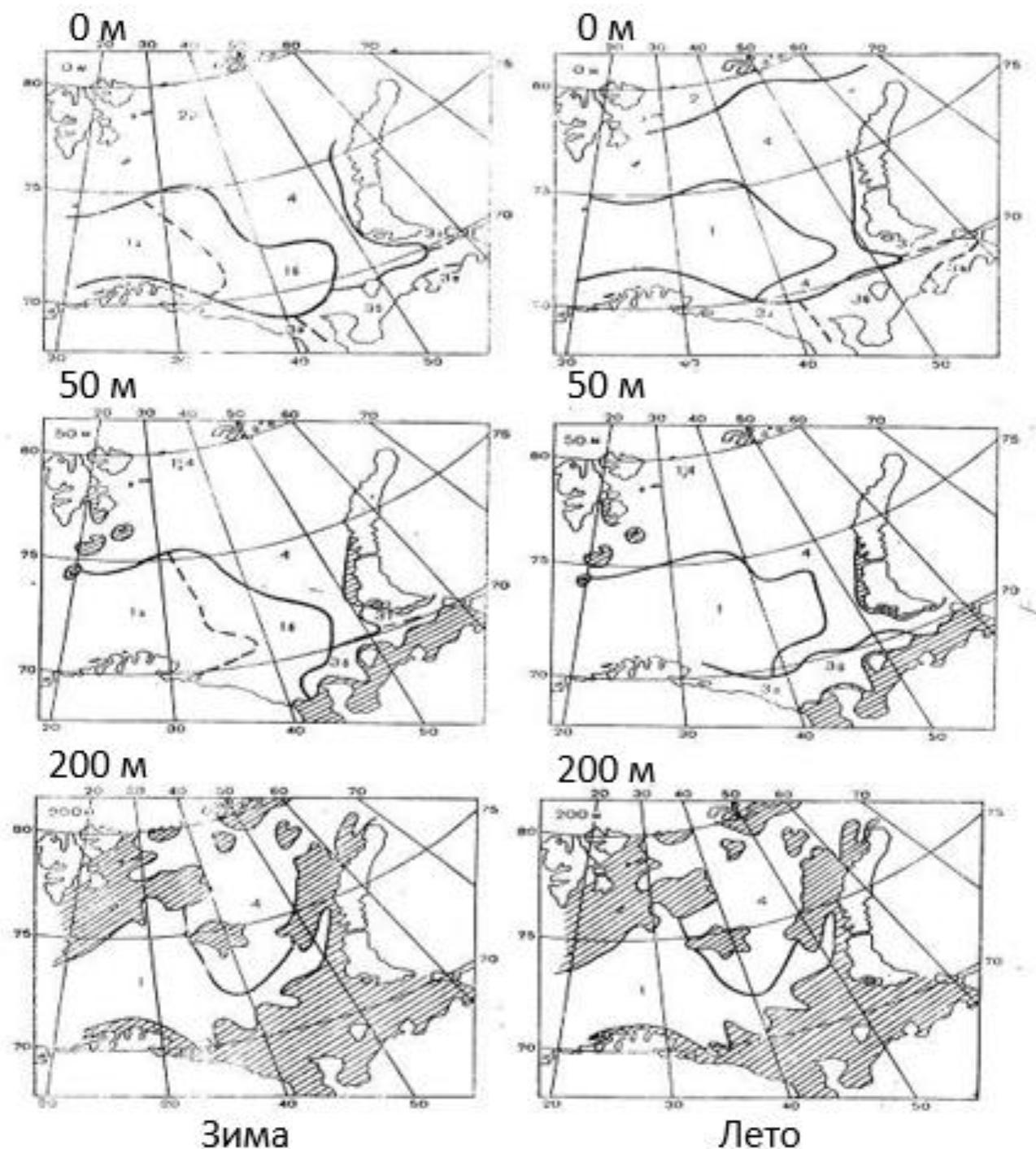


Рисунок 6. Положение водных масс зимой (слева) и летом (справа) на акватории Баренцева моря: 1 – атлантическая, 2 – арктическая, 3 – прибрежные, 4 – баренцевоморская. Заимствован из работы [12]

Карское море

Карское море [32] характеризуется постоянством поверхностных морских течений. Основу природы их формирования составляют прежде всего сток

речных вод, а также некоторый вклад в их образование привносит водообмен с бассейнами, прилегающими к Карскому морю. Значительную часть водообмена занимает Баренцево море, так как во многих местах оно граничит с Карским морем. Указанные выше причины дают возможность сформироваться круговороту вод, направленному по часовой стрелке, который располагается в юго-восточной части Карского моря (рис.7). Сильные стоковые течения в свою очередь формируют одну из самых интенсивных фронтальных зон моря – Стоковую.

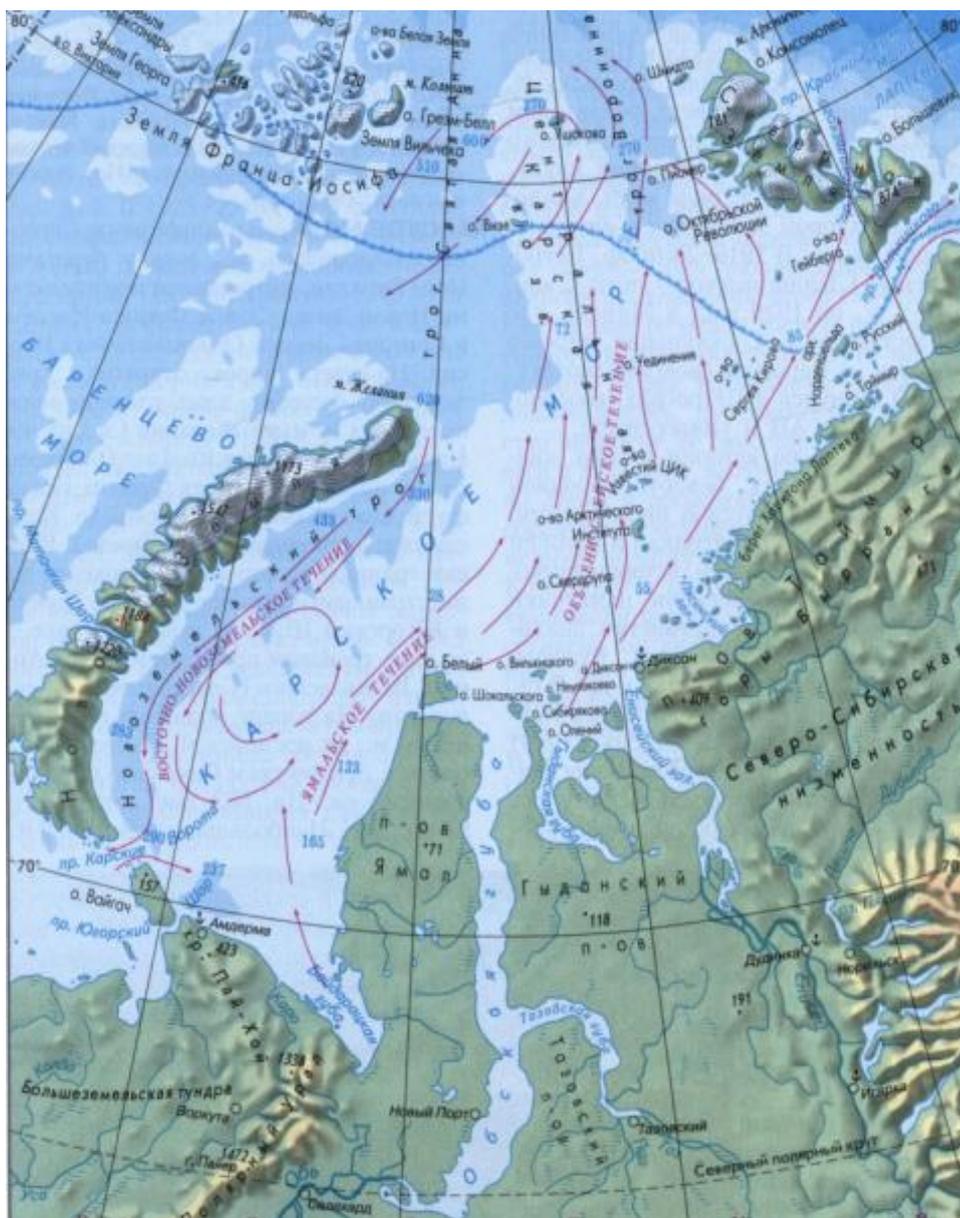


Рисунок 7. Схема поверхностных течений Баренцева моря [12]

В тоже время за счет Обь-Енисейского течения и баренцеворских вод с запада формируется менее значительный по масштабам круговорот вод с юга. Большой вклад в данный круговорот вносят воды, которые поступают через проливы Югорский Шар и Карские ворота.

Самое интенсивное течение Карского моря – Обь-Енисейское – разделяется на множество ветвей, в целом двигаясь на север моря. Первая ветвь встречается у районов о. Новой Земли, разделяясь ещё на несколько частей, одна из которых имеет собственное название – Новоземельское течение. Данное течение следом разделяется ещё на ветвь, продвигающуюся на запад моря – течение Литке. Далее о п-ва Ямал в северную часть моря отделяется ещё одна ветвь, которая называется Ямальское течение. Именно оно затем встречается с западной частью Обь-Енисейского. Таким образом сформировывается круговорот поверхностных вод на юго-западе Карского моря.

Вторая ветвь данного течения уходит в глубь Карского моря и доходит до архипелага Северная Земля. Третья ветвь течения продвигается на северо-восток, достигая берегов Таймыра. В конечном счете отклоняясь на северо-запад у о. Русский формируется большой круговорот вод в северо-западной части Карского моря.

Значительное влияние на формирование поверхностных течений Карского моря оказывается климатическая и атмосферная изменчивость в регионе. В целом круговорот вод может изменять направление или становиться мелкомасштабным, или субмезомасштабным. Максимальные скорости течений, наблюдаемые в Карском море при воздействии атмосферных процессов, могут достигать 90 см/с. Средние значения характеристик течений могут варьироваться от 5 см/с до 15 см/с.

В Карском море на формирование сезонной Стоковой фронтальной зоны основное влияние оказывает теплый поток речных вод сибирских рек Енисея и Оби. В результате воздействия фронтальной зоны в летний период температура

поверхности может прогреваться до 10°C. На общие колебания температуры воды в Карском море влияет несколько основных факторов [21]:

1. Распределение льдов на акватории моря;
2. Величина речного стока крупных сибирских рек Енисея и Оби;
3. Притока теплых глубинных атлантических и баренцевоморских вод;

Формирование фронтальных зон на акватории морей всецело зависит от градиентов температур, изменение самой температуры на акватории Карского моря незначительно (рис.8). Например, в центральной части в летний период температура составляет 4–3°C. В южной части Карского моря в районе стока речных вод 10–12°C. В западной части под влиянием теплых баренцевоморских вод температура поверхности достигает 8°C. Минимальные температуры наблюдаются в северных районах – до –1,5°C.

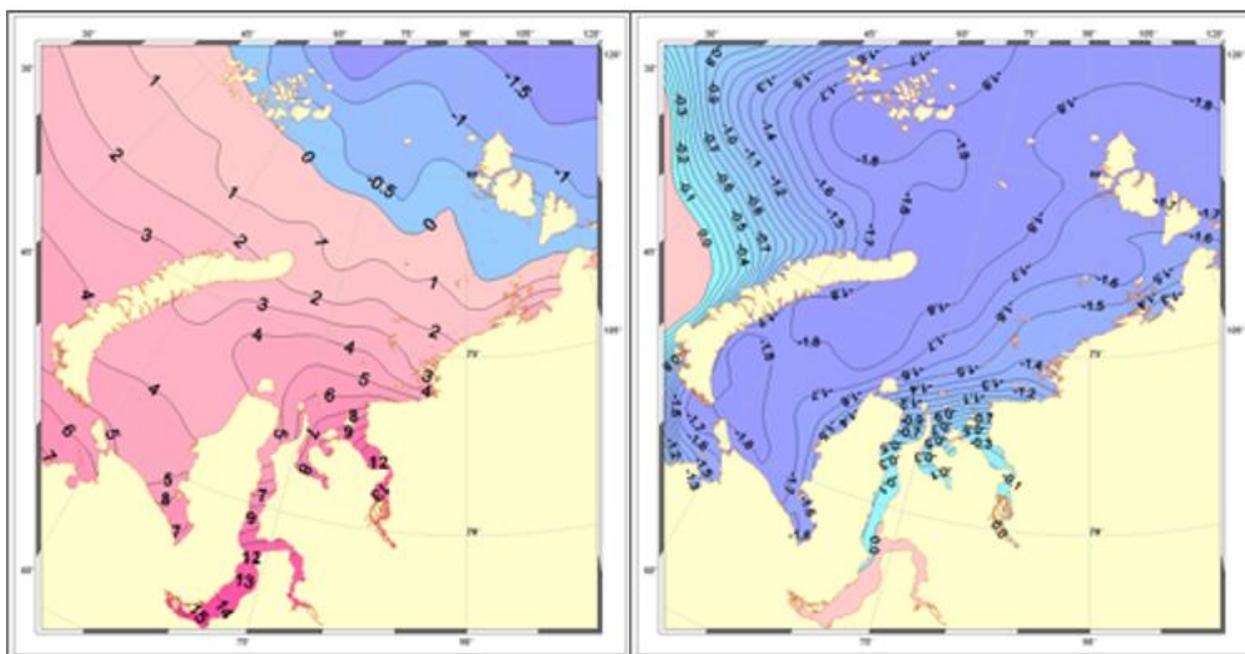


Рисунок 8. Среднегодовая температура воды в Карском море на поверхности в летний (слева) и зимний (справа) периоды [21]

Стоковая фронтальная зона, имеющая сезонный характер, прослеживается только в летний период. На акватории моря можно отследить

другую сезонную фронтальную зону, формирующуюся за счет таяния льдов. Ближе к осени фронтальные зоны сложнее зафиксировать ввиду быстрого выхолаживания и выравнивания температуры поверхности вод.

Вертикальное изменение температуры неоднородно и зависит от рельефа дна и теплых придонных течений, и зимнего охлаждения. Прогрев в северной и восточных частях Карского моря распространяется на глубину до 10–15 метров, в южных частях моря – до 70 м.

Характеристика солености в Карском море подвержена различным факторам формирования: значительный материковый сток, таяние арктического льда и прямое взаимодействие с океаном.

Изменчивость характеристики в целом значительна, так как прежде всего зависит от материкового стока. Пределы изменчивости могут быть от 3‰ до 5‰ в районах с речным стоком до 34‰ в центральной и северной части Карского моря (рис.9). Также характеристика подвержена резкой изменчивости в течении сезонов. Например, в зимние месяцы формируется значительная ледовая кромка и за счёт малого стока речных вод характеристика может достигать максимальных значений за весь период года. В среднем поверхностные значения солености составляют от 25‰ до 30‰. Основная тенденция изменчивости характеристики – увеличение с южной части к северной части моря.

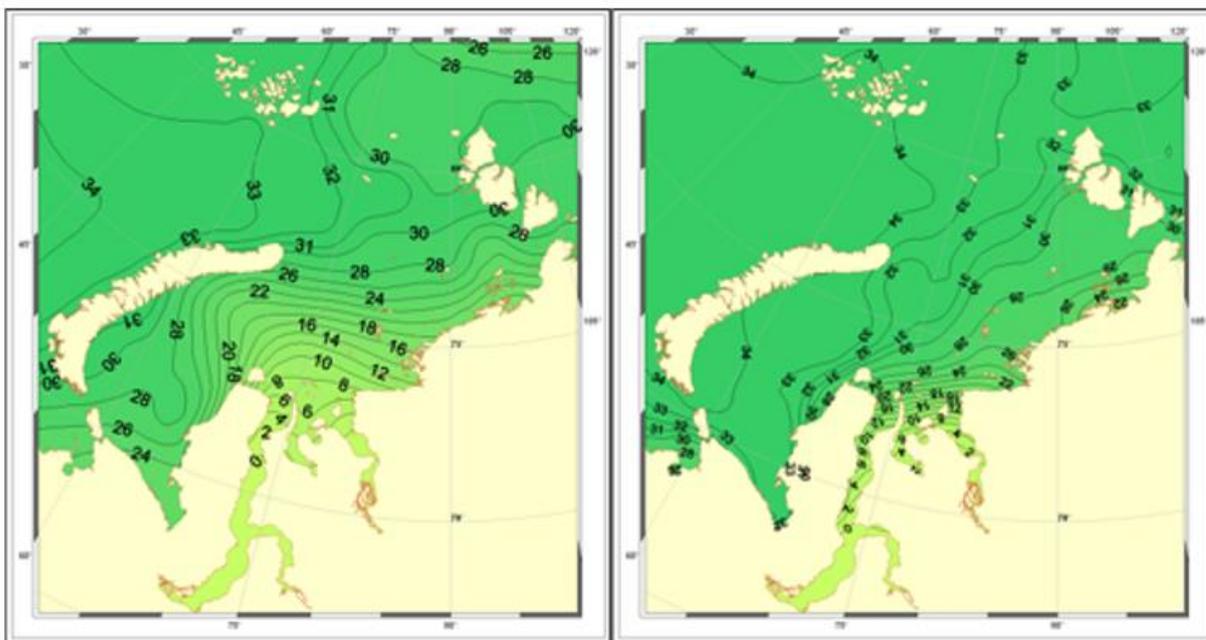


Рисунок 9. Среднеголетняя соленость воды в Карском море на поверхности в летний (слева) и зимний (справа) периоды [21]

Водные массы Карского моря (рис.10) формируются под влиянием речного стока великих сибирских рек Оби и Енисея в южной части моря, и адвекции арктических и атлантических вод в северной и восточной частях моря. Стоит отметить, что распространение водных масс, формирование которых обуславливается речным стоком сильно зависит от господствующих ветров.

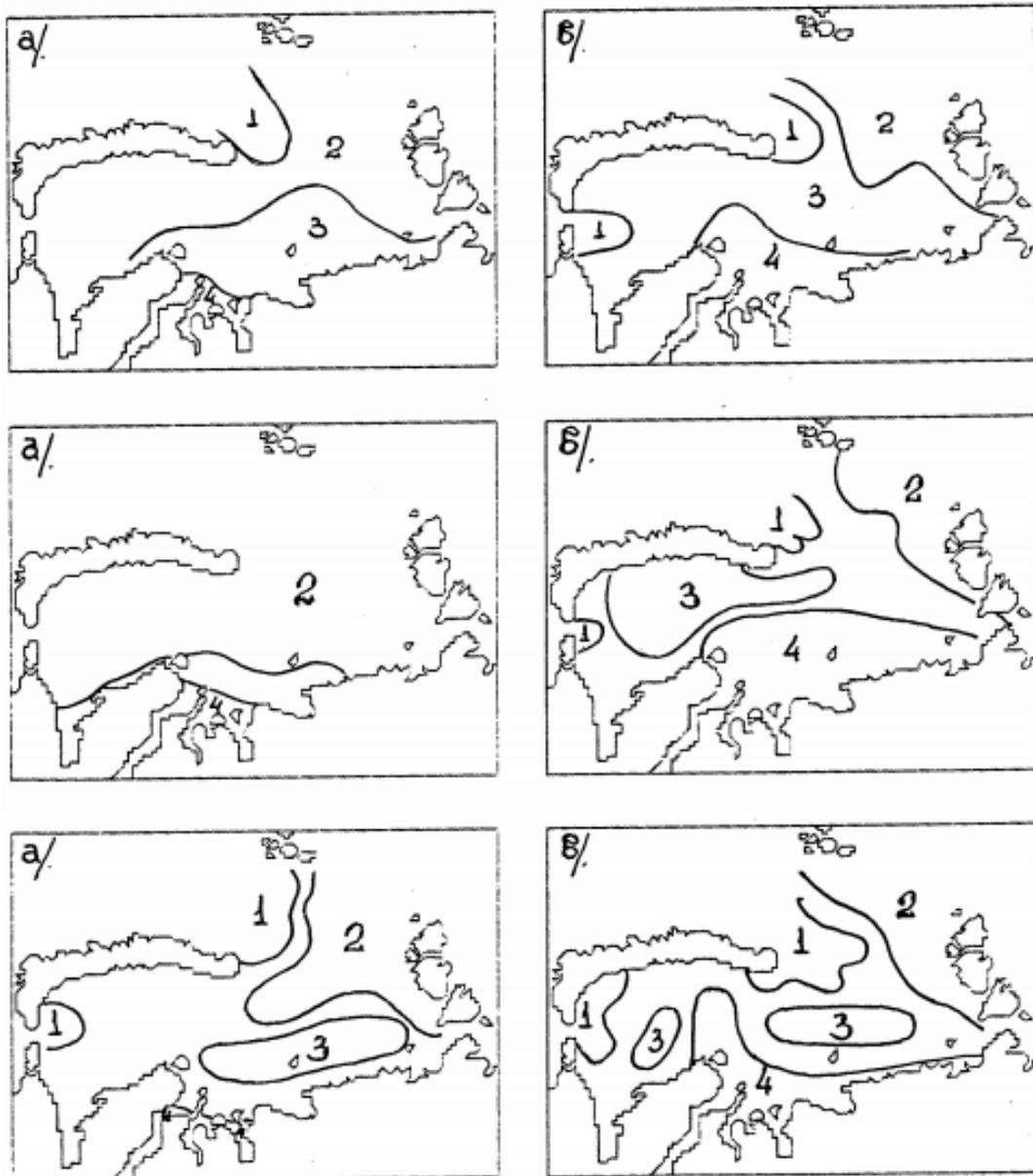


Рисунок 10. Положение водных масс зимой (слева) и летом (справа) на акватории Карского моря: 1 – баренцевоморская, 2 – поверхностная арктическая, 3 – поверхностная карская, 4 – речные воды. Заимствован из работ; а – зимний период, б – летний период [35]

Арктическая водная масса. Формируется на морской поверхности, не достигая значительной глубины. Основная отличительная особенность – большая изменчивость значений солености и температуры. За счет охлаждения в зимний период года в водах происходит накопление солей из-за образования

льдов, которое в свою очередь запускает процесс конвекции, вследствие которого увеличивается их однородность. Характеристики данной водной массы в целом не изменяются в течение года. Соленость вод составляет 33‰, а температура вод может достигать $-1,5^{\circ}\text{C}$.

Баренцевоморская водная масса. Данные воды формируются за счет притока атлантических вод, поступающих через Новоземельские проливы. Температура данной водной массы в целом однородна и может достигать 10°C . Также воды отличаются большими значениями солености в течение всего года – до 35‰.

Атлантическая водная масса. Глубинные воды, поступающие с Атлантического океана посредством перемещения через глубоководные желоба – Святой Анны и Воронина. За счет большей плотности и высоких значений солености они проходят далее на север, распространяясь вдоль Евразийского шельфа.

Речные воды. Данные воды распресненные за счет значительного материкового стока и наиболее заметны в весенний период года, так как за счет выноса их тепла они способствуют быстрому радиационному прогреву. Именно речной сток формирует Стоковую фронтальную зону.

1.3. Фронтальные зоны

Положение фронтальных зон в Баренцевом море не стационарно и зависит от климатических условий и адвекции тепла течениями.

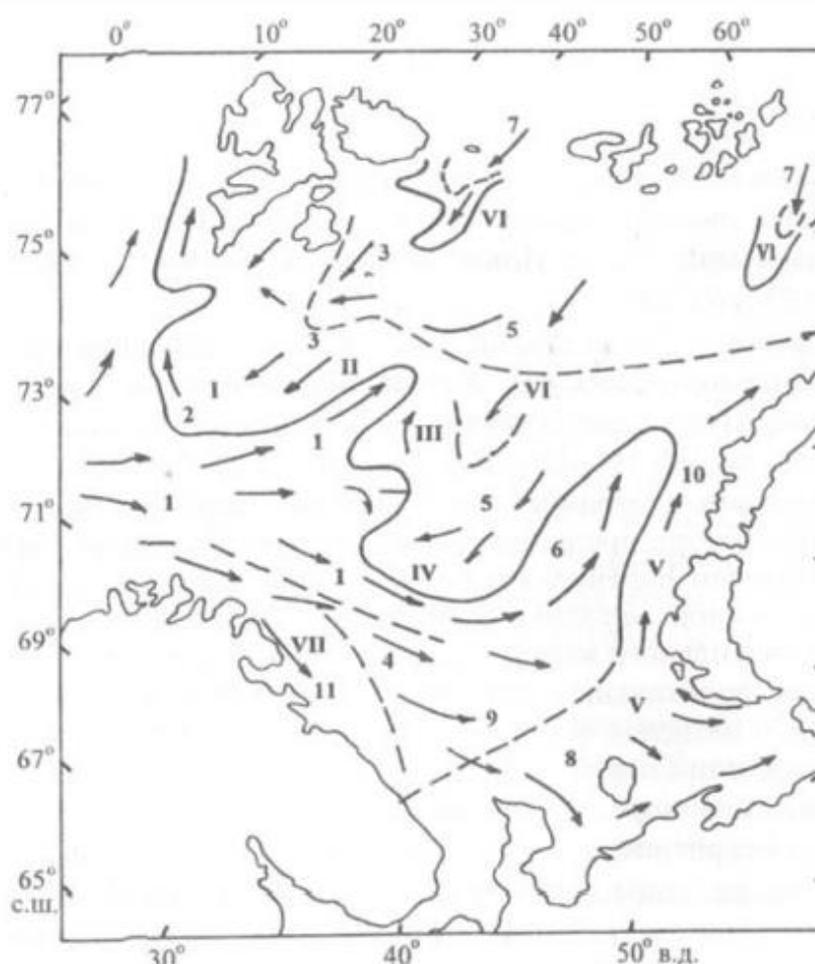


Рисунок 11 – Схема основных течений и фронтальных зон Баренцева моря. Римскими цифрами обозначены фронтальные зоны: I – Медвежинская; II – Западного желоба; III – Центральной возвышенности; IV – Центрального желоба; V – Восточной части моря; VI – Прикромочая (Арктическая) и глубинные; VII – Прибрежная. Арабскими цифрами обозначены течения: 1 – Нордкапское; 2 – Медвежинское; 3 – Восточно-Шпицбергенское; 4 – Мурманское; 5 – Центральное; 6 – Новоземельское; 7 – Глубинное; 8 – Колгуево-Печерское; 9 – Канинское; 10 – Литке; 11 – Мурманское прибрежное. Заимствован из работы [11]

По формированию можно выделить три основные фронтальные зоны: Прикромочную, Полярную и Прибрежную (Рис.11). Прикромочная фронтальная зона (рис.10) разделяет теплые баренцевоморские, атлантические и холодные арктические водные массы. Данная фронтальная зона имеет сезонный характер. В результате данную фронтальную зону можно зафиксировать лишь в теплый период года с июня по октябрь месяц. Фронтальная зона формируется за счет таяние прикромочного льда Арктического шельфа [12]. Особенностью детектирования данной фронтальной зоны является то, что она отмечается только на морской поверхности [13]. В тоже время данная зона сильно зависит от климатической изменчивости. Характеризуется перепадами температуры от 1,5–3,0°C, солёности – 0,30–0,35 ‰ [12].

Полярная фронтальная зона является самой протяженной, так как объединяет V фронтальных зон более мелкого масштаба. Также она имеет климатический характер осреднения. Пересекая все Баренцево море с западной части на восточную от 73° до 76°с.ш., она разделяет баренцевоморскую и атлантическую водные массы [12]. За счет адвекции тепла Нордкапским течением детектирование фронтальной зоны в районе 73–74°с.ш. представляется вполне возможным. Однако следом с началом перемешивания атлантической и баренцевоморской водной массой её положение детектировать гораздо сложнее. Изменяясь от направления ветровых течений фронт может перемещаться на большие расстояния всего за несколько суток [14]. Важной особенностью фронтального раздела является то, что он прослеживается на значительных глубинах. Фронт характеризуется градиентами солёности до 0,1‰ и градиентами температуры до 1°C на 1 морскую милю [15].

В прибрежной части Баренцева моря (рис.11) формируется прибрежная фронтальная зона, разделяющая прибрежную и баренцевоморскую водную массу [12]. Однако в работе из-за сложностей, связанных с её детектированием, она рассматриваться не будет.

В Карском море выделяют множество локальных фронтальных зон, как правило, имеющих сезонный характер. Из данного многообразия выделяются две основные фронтальные зоны, которые интересны для изучения с точки зрения генезиса.

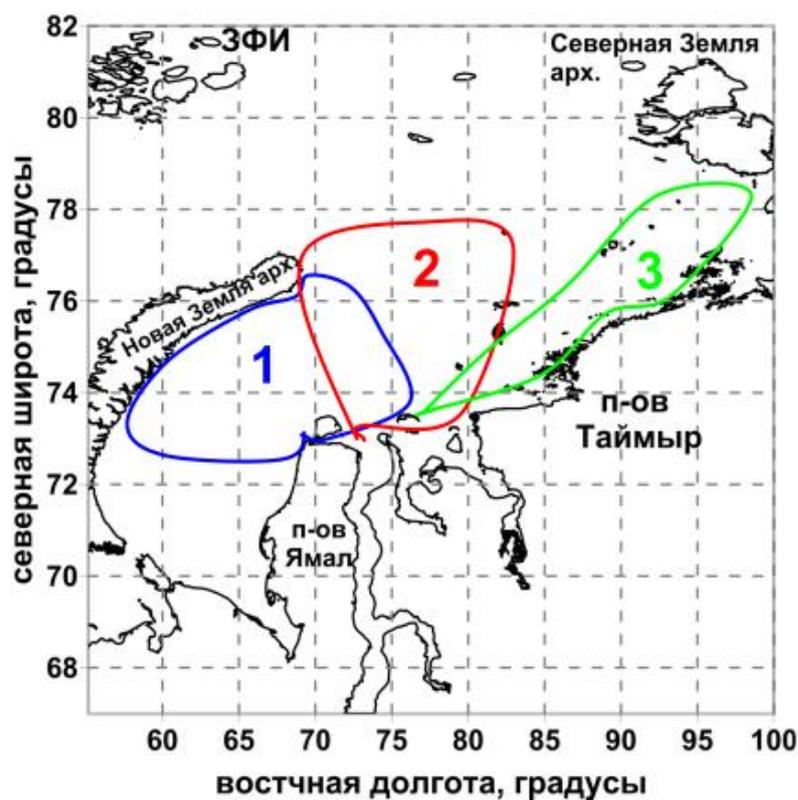


Рисунок 12. Типы распределения речного стока в Карском море: 1 – западный тип, 2 – центральный тип, 3 – восточный тип. Рисунок заимствован из [23]

Стоковая фронтальная зона может фиксироваться в поле температуры (граница между теплыми речными водами и холодными морскими водами) и в поле солености [22]. Как уже отмечалось, существует три основных распределения речного стока [23]: западный (отклоняясь к северо-западу), центральный (по большей части моря) и восточный (продвигается в сторону моря Лаптевых). Прохождение речных вод на запад к Новой Земле приводит к изоляции вод юго-западной части Карского моря от притока холодных вод с севера, что при взаимодействии с притоком летних баренцевоморских вод через южные Новоземельские проливы (Карские ворота и Югорский Шар) создает

условия для интенсивного прогрева вод в этом районе [35]. Стоковая фронтальная зона обычно маркируется лишь по соленосным градиентам [19,22,24] или распространению хлорофилла «а» [25], однако в работах [19,23] Стоковые фронты фиксируются с помощью прямых измерений температуры поверхности вод [26]. Однако обобщенных сведений об изменчивости положений и количественных характеристиках фронтов и в целом Стоковой фронтальной зоны в современных климатических условиях нет.

Прикромочная фронтальная зона в Карском море является частью зоны, прослеживающейся в Баренцевом море. Соответственно, фронтальная зона также имеет сезонный характер и прослеживается только в теплый период года. Фронт формируется вблизи арктического льда на периферии холодных вод за счет его таяния [11]. Свой вклад в образование данной фронтальной зоны вносит течение Персея и течение Святой Анны [27]. О данной фронтальной зоне имеются лишь отрывочные сведения [28], не дающие полную и систематическую картину его изменчивости.

Глава II. Материалы и методы

2. 1. Исходные данные для изучения фронтальной динамики

Для анализа изменчивости фронтов и фронтальных зон в качестве исходных данных использовалась температура поверхности Баренцева и Карского морей из реанализа GHRSSST OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis.

GHRSSST – это открытая международная научная организация, которая занимается применением спутников для планетарного мониторинга температуры морской поверхности. Основная деятельность данной организации заключается в сборе данных в региональные центры, обработке, хранении и их реанализ (объединении фактических и спутниковых наблюдений) [8]. Данные объединяют прямые и спутниковые измерения в океане, формируя большую базу данных реанализа. Модель учитывает метаданные, ледовую обстановку на акватории морей и различные ошибки в расчетах.

Основу реанализа GHRSSST OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis составляют прямые экспериментальные данные, полученные с систем, дрейфующих буйковых станций, стационарных платформ и гидрологических судов, которые затем ассимилируют моделью.

Данные скачивались с сайта <http://apdrc.soest.hawaii.edu/> за период с июня по октябрь 2007 и 2011 года с разрешением $0,054^\circ$ по широте и долготе со среднесуточной дискретностью. Пример первичных необработанных данных за 01.07.2007 представлен на рисунке 13. Район скачивания данных распространялся от западной границы Баренцева до восточной границы Карского моря (с 16° в.д до 105° в.д. и 69° с.ш. до 81° с.ш).

Далее производилось осреднение данных температуры поверхности Баренцева и Карского морей по месяцам (июнь, июль, август, сентябрь, октябрь) и декадам (каждые 10 дней в каждом месяце теплого сезона). Осреднение данных количественных характеристик производилось в программе MS Excel с помощью стандартных функций осреднения.

Общий объем первичных данных, загруженных в программу MS Excel для обработки, составил 448 (Мб). За каждый месяц и декаду расчетная сетка с данными составила 1800:400 значений ТПМ. Объем одной осредненной карты ТПМ в среднем составил 15 (Мб). Общий объем всех осредненных карт ТПМ за 2007 и 2011 года составил 430 (Мб).

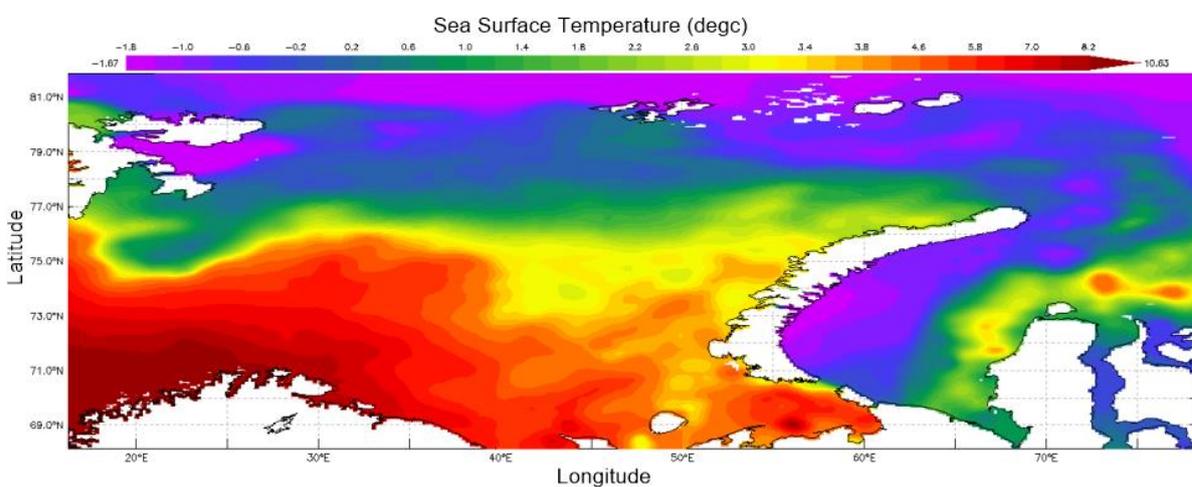


Рисунок 13. Карта ТПО Баренцева и Карского морей 01.06.2017 года.

Суточное осреднение

2.2. Методика обработки исходных данных

По методике, представленной в [16], выполнялся расчет среднемесячных и среднедекадных градиентов температуры для каждой точки поля (i;j) по формулам (1–5), используя осредненные значения температуры поверхности моря. Во время вычислений точки имели индексацию, представленную на рисунке 14.

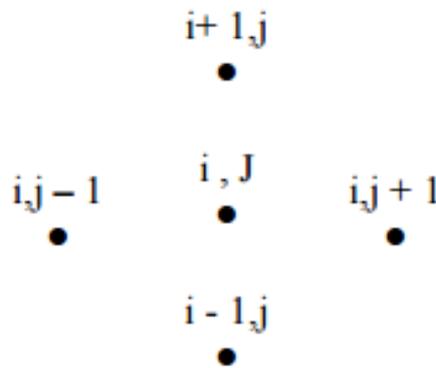


Рисунок 14. Схема узлов сетки с рассчитываемыми индексами (i;j).

Шаги расчетной сетки по параллели (ΔS_1 , км) и по меридиану (ΔS_2 , км) рассчитывались по формулам (1–2).

(1)

$$\Delta S_1 = 1,852 \times |\lambda_{j+1} - \lambda_j| \times \cos \frac{\varphi_{i+1} + \varphi_{i-1}}{2}$$

$$\Delta S_2 = 1,852 \times |\varphi_{i+1} - \varphi_i| \quad (2)$$

где λ – долгота;

φ – широта;

Зональная $\left(\frac{\partial D}{\partial x}\right)$ и меридиональная $\left(\frac{\partial D}{\partial y}\right)$ составляющие градиента в определенной точке вычислялись по формулам (3–4).

$$\frac{\partial D}{\partial x} = \frac{D_{i,j+1} - D_{i,j-1}}{2 \times \Delta S_1} \quad (3)$$

$$\frac{\partial D}{\partial y} = \frac{D_{i+1,j} - D_{i-1,j}}{2 \times \Delta S_2} \quad (4)$$

Модуль горизонтального градиента ($|GradD|$, °C/км) рассчитывался по формуле (5).

$$|GradD| = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial y}\right)^2} \quad (5)$$

где D – значение параметра (ТПМ) в узлах регулярной сетки;

В качестве примера результатов расчета на рис. 15 представлены осредненные карты температуры поверхности и градиентов Баренцева моря за август 2011 года.

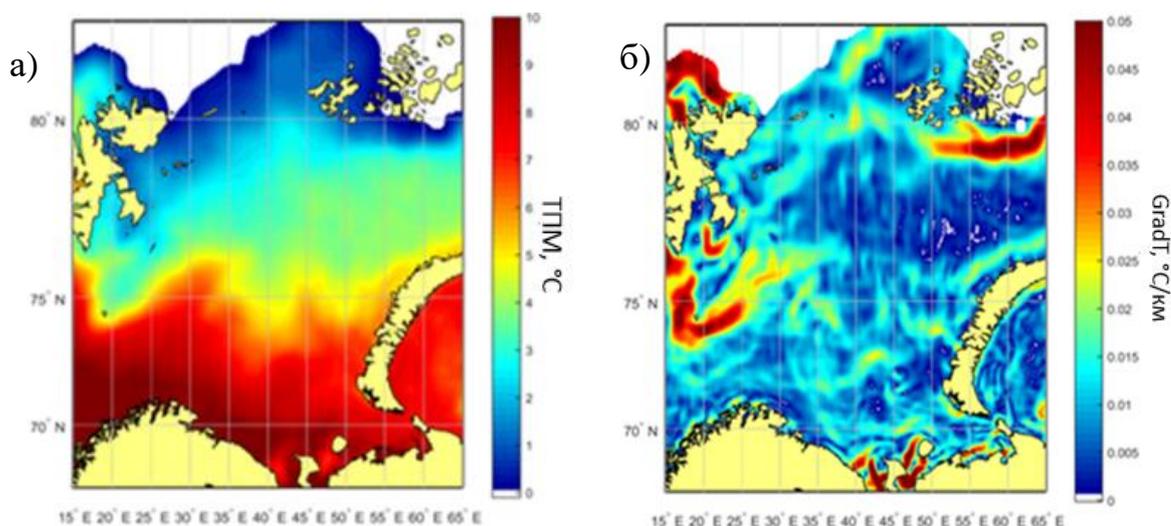


Рисунок 15. Карты среднемесячной температуры поверхности (а) и среднемесячного градиента температуры поверхности (б) Баренцева моря в августе 2011 года

Из рис.15 можно видеть, что максимальные значения ТПМ наблюдаются в центральном и прибрежном районе Баренцева моря и составляют более 10°C . Минимальные значения ТПМ наблюдаются в северной части моря, в районе $78-80^{\circ}$ с.ш. Максимальные значения градиентов в августе 2011 года в Баренцевом море наблюдаются в районе о. Земли Франца Иосифа, о. Медвежий и составляет более $0,05^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Минимальные градиенты наблюдаются в северо-восточной и прибрежной части Баренцева моря. Однако, с помощью простого анализа карт градиентов и ТПМ зафиксировать фронтальные зоны не удастся.

Для выделения фронтальных зон на акватории морей по [4], градиент температуры внутри них должен значительно превышать климатический градиент. В Баренцевом и Карском морях климатический градиент поверхностной температуры не превышает $0,01^{\circ}\text{C}/\text{км}$ [16]. В работах [11,33] значение измеренного градиента температуры Баренцева моря достигало $0,08^{\circ}\text{C}/\text{км}$, в Карском море $0,03^{\circ}\text{C}/\text{км}$. При таком соотношении значений градиентов применение критерия десятикратного превышения градиента температуры во фронтальной зоне над фоновым [4] для выделения фронтальных зон для моря не приемлемо. Даже при использовании критерия двойного превышения климатического градиента, как в работе [11,16], фронтальные зоны на поверхности распадаются на отдельные пятна и не всегда четко прослеживаются на всей акватории моря.

Поэтому для выделения положения фронтальной зоны на акватории Карского и Баренцева морей строились композитные карты (рис.16. а) ТПМ и градиентов ТПМ. С их помощью по интенсивности изолиний температуры определялись характерные изотермы, положение которых соответствовали фронтальным разделам, а вне зоны высоких градиентов принимались как координаты основного фронтального раздела, аналогично методике, изложенной в [34].

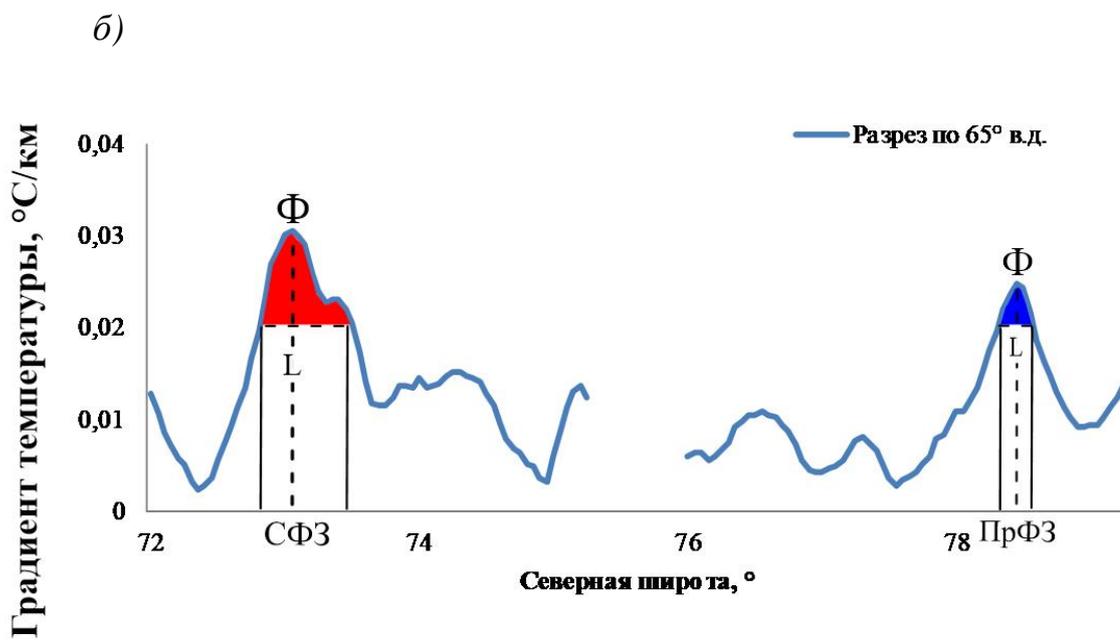
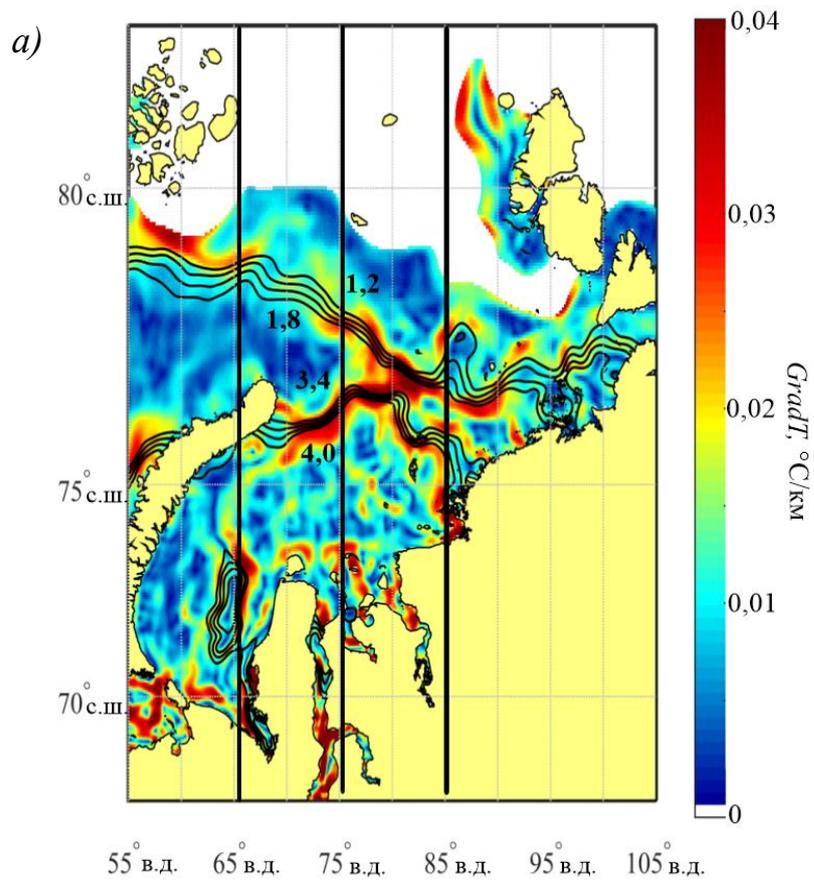


Рисунок 16. Методика выделения положения фронтальной зоны и фронтальных разделов в районе Карского моря. а – композитная карта градиентов и изолиний температур поверхности моря по среднемесячным данным за июль 2007 года (жирные вертикальные линии – меридиональные разрезы, на которых определялись характеристики фронтальных зон), б – Разрез градиента температуры вдоль 65° в. д. с примером выделения положения фронтов и ширины фронтальных зон (СФЗ – Стоковая фронтальная зона, ПрФЗ – Прикромочная фронтальная зона, L – ширина фронтальной зоны, Ф – положение фронта на разрезе)

Для уточнения положения основного фронта внутри фронтальной зоны и оценки количественных характеристик фронтальных разделов проводились три меридиональных разреза по 20°, 35°, 50° в.д. в Баренцевом море и по 65°, 75°, 85° в.д. в Карском море (на рис.16.а–три черных линии).

Количественные оценки вычислялись для декадных полей градиентов температуры, которые далее усреднялись на среднемесячном и сезонном интервалах. Пример разреза градиента ТПМ вдоль 65° в.д. в районе Карского моря, представлен на рис.16.б. Два выделенных пика, основанные на критерии двойного превышения, соответствуют Стоковой и Прикромочной фронтальным зонам. Наивысшее значение этих пиков на данном разрезе– максимальный градиент, являющийся положением основного фронтального раздела во фронтальной зоне. По данным трех разрезов по декадам определялись [4]: средняя ширина фронтальной зоны, средне–фронтальный и максимальный градиент ТПМ в ней.

Средняя ширина фронтальной зоны определялась с помощью специального макроса в MS Excel. Использовался калькулятор расчета расстояния между двумя координатами.

Средне–фронтальный градиент рассчитывается с помощью формулы (6):

$$\overline{G}_{\text{фз}} = \frac{T_n - T_k}{L} \quad \text{б)}$$

где $\overline{G_{\phi_3}}$ – градиент фронта, T_n – значение ТПО начала фронтальной зоны, T_k – значение ТПО конца фронтальной зоны, L – ширина фронтальной зоны.

В тех местах, где с помощью разреза не удавалось получить координаты фронтального раздела, применялась техника его выделения вдоль изолинии температуры, тем самым уточняя его положение в областях малых градиентов. Количественные оценки меридиональных разрезов, на которых не зафиксирован критерий двойного превышения градиента далее в работе не учитывались.

Глава III. Фронтальная динамика в Баренцевом море в 2007 и 2011 году

3.1. Изменчивость положения фронтальных разделов в теплый сезон

На основании ранее представленной методики произведен расчет градиентов для среднемесячных и декадных данных температуры поверхности моря. С помощью проведенных расчетов были построены карты изменчивости градиентов температуры за теплый сезон 2007 и 2011 годов. В качестве примера на рис. 17 (а; б) представлены две карты с распределением градиентов температуры за август 2007 и 2011 года.

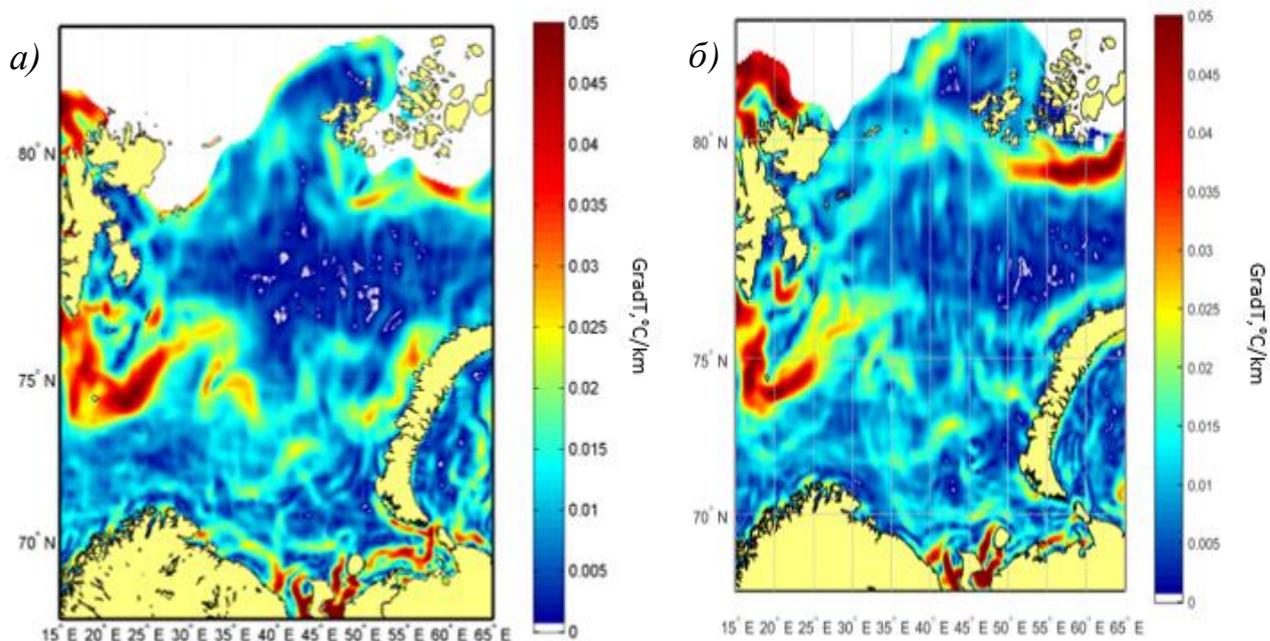


Рисунок 17. Распределение градиента температуры поверхности на акватории Баренцева моря в августе 2007 (а) и 2011 (б) года

Анализируя представленные карты, можно хорошо проследить основные зоны высокого значения градиента ТПМ – район о. Шпицбергена, о. Медвежий,

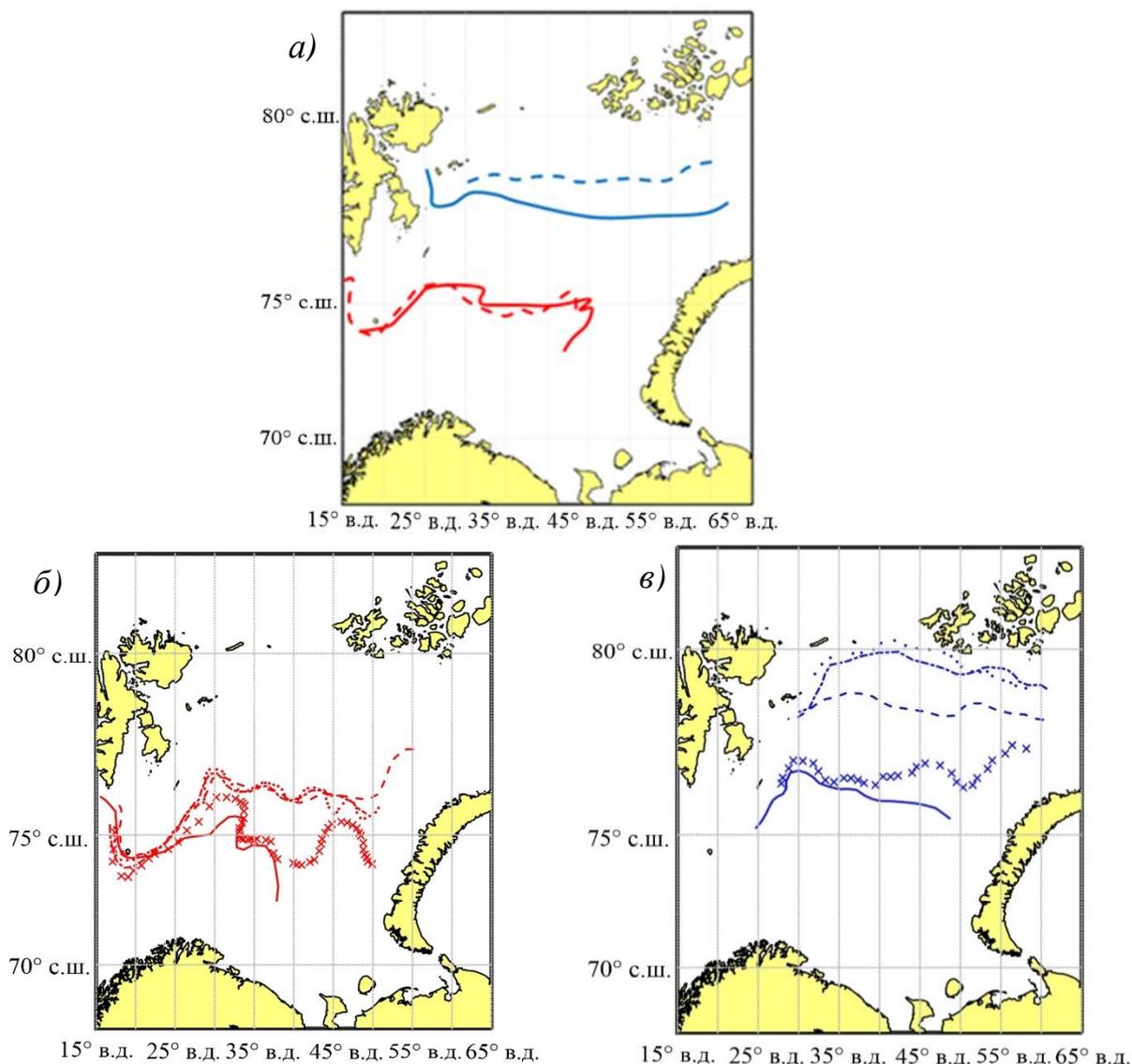
о. Земли Франца–Иосифа, горло Белого моря. В 2007 году более ярко выражены прибрежные зоны, нежели в 2011. Например, градиент прибрежной фронтальной зоны около о. Новой Земли в 2011 году уменьшился на $0,02^{\circ}\text{C}/\text{км}$, по сравнению с 2007 годом. В тоже время в 2011 году отмечаются более интенсивные градиенты в районе о. Земли Франца Иосифа, чем в 2011. В целом на акватории моря максимальный градиент отмечается в районе о. Медвежий – $0,05^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Средний градиент на акватории моря совпадает с представленным в [16] значением климатического градиента температуры и составляет $0,01^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

Анализируя все полученные среднемесячные и среднедекадные карты градиентов в Баренцевом море, удалось установить, что Прикромочная фронтальная зона имеет незначительные значения градиентов температуры. Однако, в некоторых районах, таких как о. Шпицберген или о. Земли Франца Иосифа градиент может достигать от $0,025$ до $0,05^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Это связано прежде всего с интенсивным таянием кромки арктического льда в теплый период года. Значительный вклад в формирование фронтальной зоны вносят активные действия Восточно–Шпицбергенского и Медвежьеостровского течения [11], разделяющие холодные арктические и умеренные баренцевоморские воды. В районе $30\text{--}50^{\circ}$ в.д. зафиксировать данную фронтальную зону сложно, опираясь лишь на данные с карт градиентов температуры.

Максимальные градиенты Полярной фронтальной зоны отмечаются около о. Медвежий и составляют $0,04\text{--}0,05^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Стоит отметить интенсивность градиента ТПМ в районе о. Новой Земли, где отмечается градиент до $0,03^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Основная причина высокого значения градиента в Полярной фронтальной зоне в районе о. Медвежий – интенсивное Нордкапское течение [21], и смешивание различных по своим гидрологическим характеристикам атлантических и баренцевоморских вод [21].

В результате анализа графиков распределения температуры поверхности моря за 2007 и 2011 года в Баренцевом море, в зависимости от месяца в сезоне удалось выделить от 3 до 6 фронтов внутри Прикромочной фронтальной зоны и от 3 до 9 фронтов внутри Полярной фронтальной зоны.

Результаты выделения среднемесячного положения Прикромочного и Полярного фронтов Баренцева моря в 2007 и 2011 годах представлены на рис.18.б–д. Так как фронтальная зона имеет значительное число фронтальных разделов, на картах для удобства отмечается основной фронт внутри фронтальной зоны. Для сравнения представлена карта климатического положения фронтальных зон из работы [12].



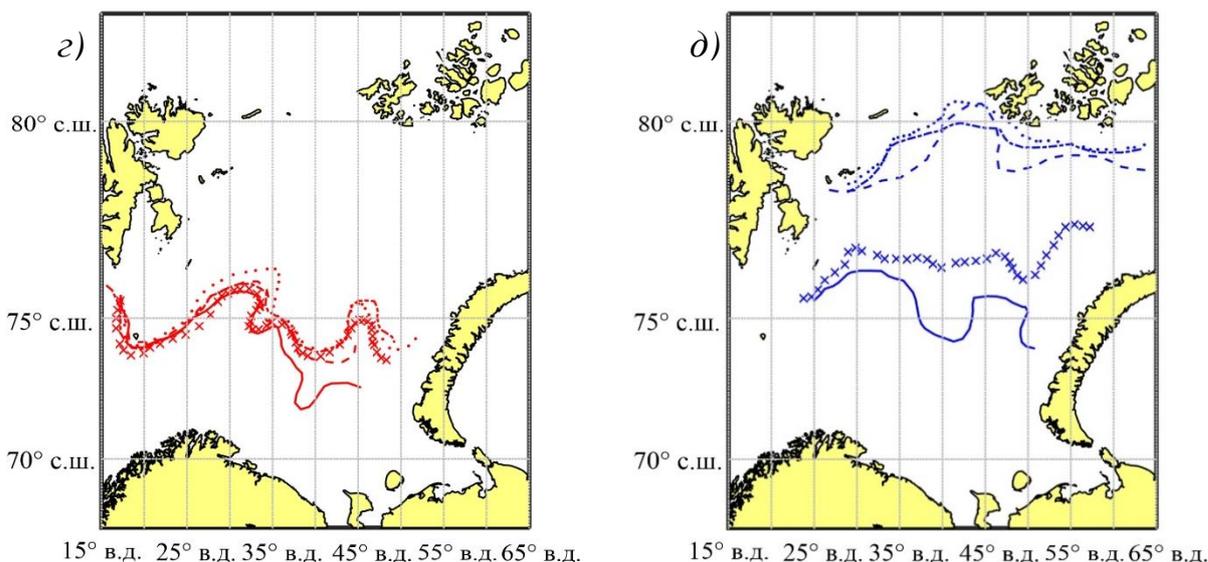


Рисунок 18. Схема положения Прикромочного и Полярного фронтов. а – климатическое (сплошная линия) и среднесезонное (штрих–линия) за 2007 и 2011 года, б–в – среднемесячное (сплошная линия – июнь; пунктирная линия – июль; точки – август; штрих–линия – сентябрь; кресты – октябрь) за теплый сезон 2007 года, г–д – среднемесячные (сплошная линия – июнь; пунктирная линия – июль; точки – август; штрих–линия – сентябрь; кресты – октябрь) за теплый сезон 2011 года

Из рисунка 18.а видно, что среднесезонное положение Полярного фронта в целом незначительно отклоняется от климатического не более чем на 10–30 км. Основное отличие заключается в том, что фронт более резко отклоняется к северу в восточной части моря. В то же время положение Прикромочного фронта сильно отличается от его климатического положения. Отклонение составляет порядка 150 км в западной части и 300 км в восточной части Баренцева моря, в среднем 250 км. Столь значительное изменение положения фронта, скорее всего, связано с ярко выраженным уменьшением площади ледового покрова, регистрируемым в эти годы. Вслед за кромкой льда сместилось и положение фронта.

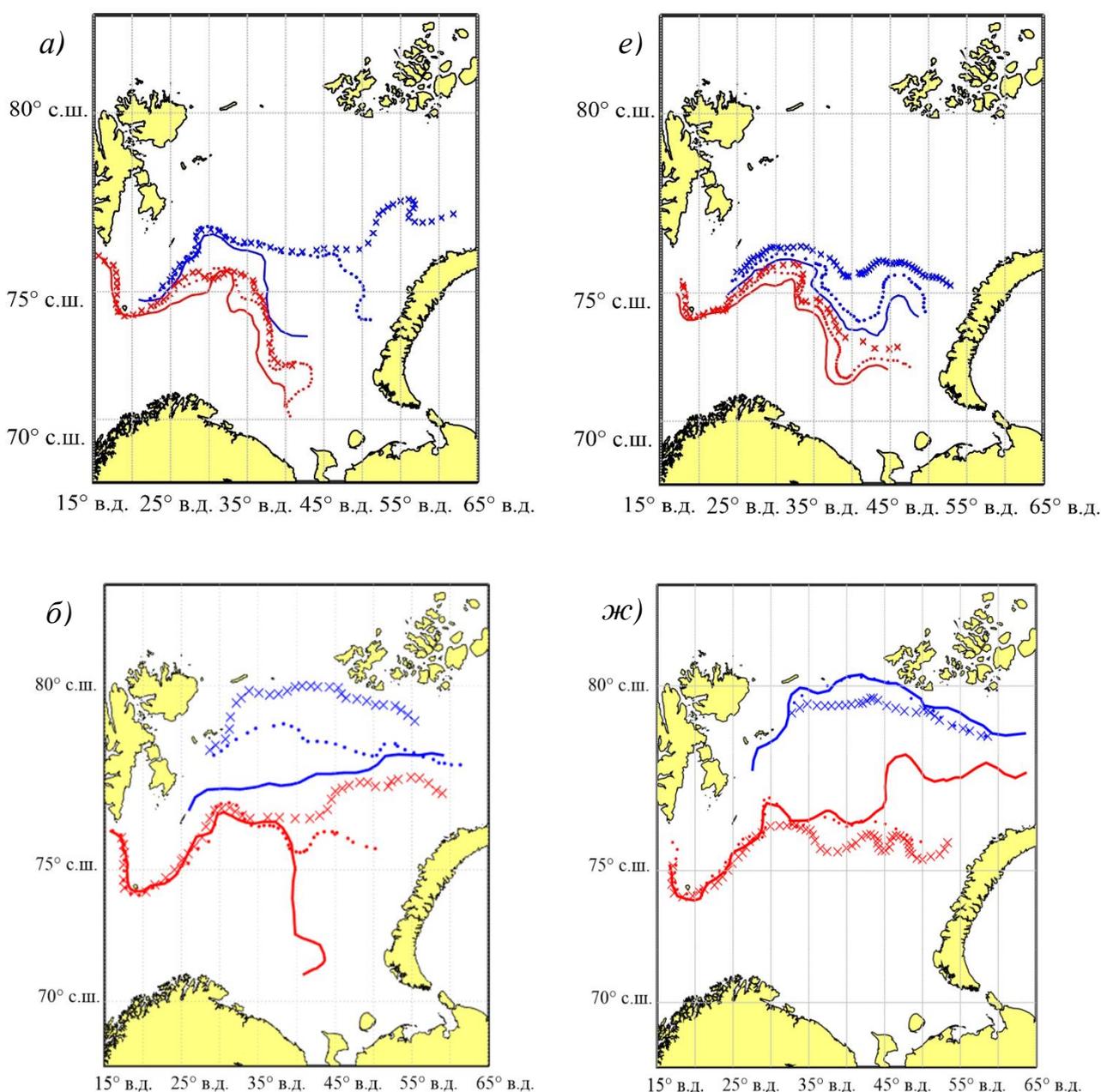
Особенности внутрисезонной динамики Прикромочного и Полярного фронта представлены на рис.18.б–д.

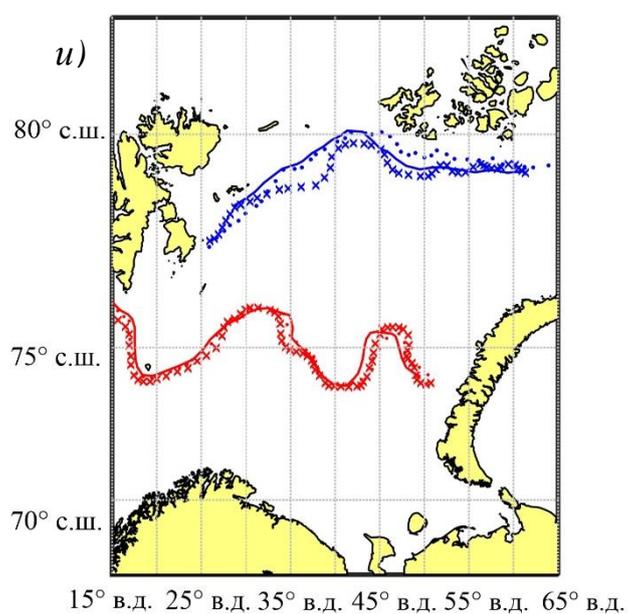
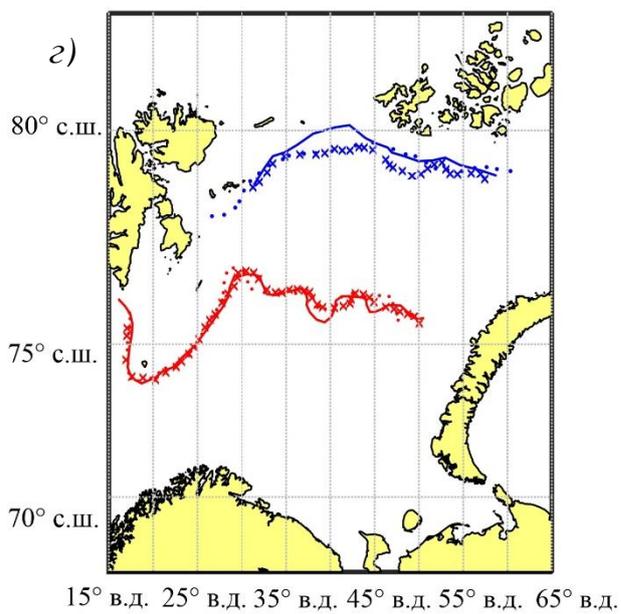
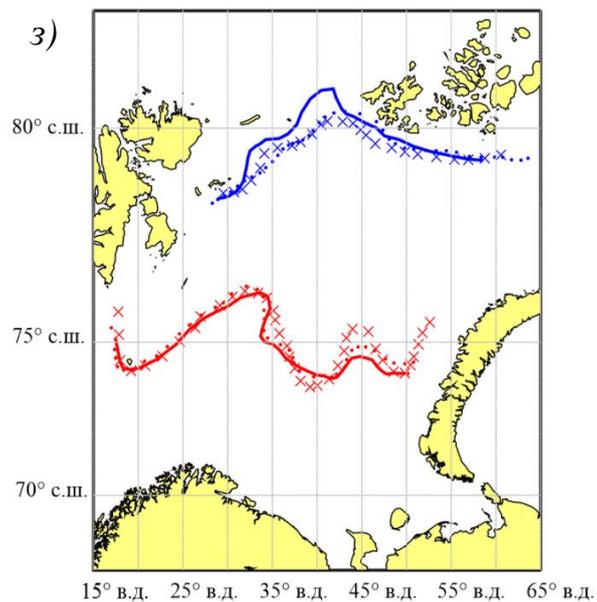
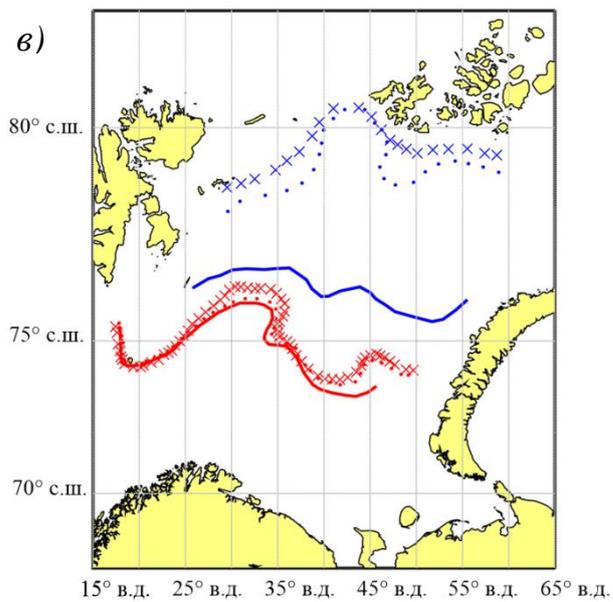
Прикромочная фронтальная зона формируется, как описывалось ранее, за счет таяния кромки арктического льда [36]. Основной фронт этой зоны динамично перемещается по всей северной части Баренцева моря как в 2007 году, так и в 2011 году (рис 18.г–д). В оба года самое южное положение фронта наблюдалось в июне, а самое северное – в августе. В оба года в июне северо–восточнее острова Медвежий, положение Прикромочного фронта находилось довольно близко к положению Полярного фронта. В июле фронт начинает движение на север ввиду отступления кромки льда за счет таяния. Однако в июле 2011 фронт имел большую изменчивость, чем в июле 2007. В августе в оба года Прикромочный фронт достигнул практически северной границы моря между архипелагом Шпицберген и Землей Франца–Иосифа. В сентябре положения фронта близко в оба года к положению в августе. Стоит отметить, что в оба года в октябре месяце Прикромочный фронт динамично перемещается обратно в центральную часть моря, что может быть связано с интенсивным выхолаживанием водной поверхности и понижением температуры вод в северной части Баренцева моря до точки замерзания.

Полярный фронт (рис.18 б–в) является квазипостоянным в западной части моря, где сконцентрированы максимальные градиенты ТПМ. Наибольшей динамике подвержена восточная часть фронта, при этом область изменчивости положения фронта в 2007 году больше, чем в 2011 году. За счет поступления теплых атлантических вод и поверхностного прогрева линия фронта в течение июня–августа активно продвигается на восток к архипелагу Новая Земля. Однако в течении сентября–августа фронт смещается обратно к материковой части моря, что связано прежде всего с интенсивным выхолаживанием морской поверхности и распадом слоя–скачка. Отметим, что изменения ТПМ в области распространения атлантических вод происходят достаточно синхронно. Изменение температуры на большой площади и значительная динамика фронта указывают на то, что тепловой режим моря в

значительной мере определяется крупномасштабными процессами, которые в отдельные месяцы характеризовались усилением адвекции тепла из Норвежского моря и интенсификацией теплообмена с атмосферой. При этом положение фронта в августе 2007 немного севернее, чем в 2011 году, что говорит о нестационарности данных процессов во времени.

Представления о внутримесячной динамике фронтов в Баренцевом море в 2007 и 2011 годах с июня по октябрь можно получить на примере карт декадных положений Прикромочного и Полярного фронтов, представленных на рис.19.а–к.





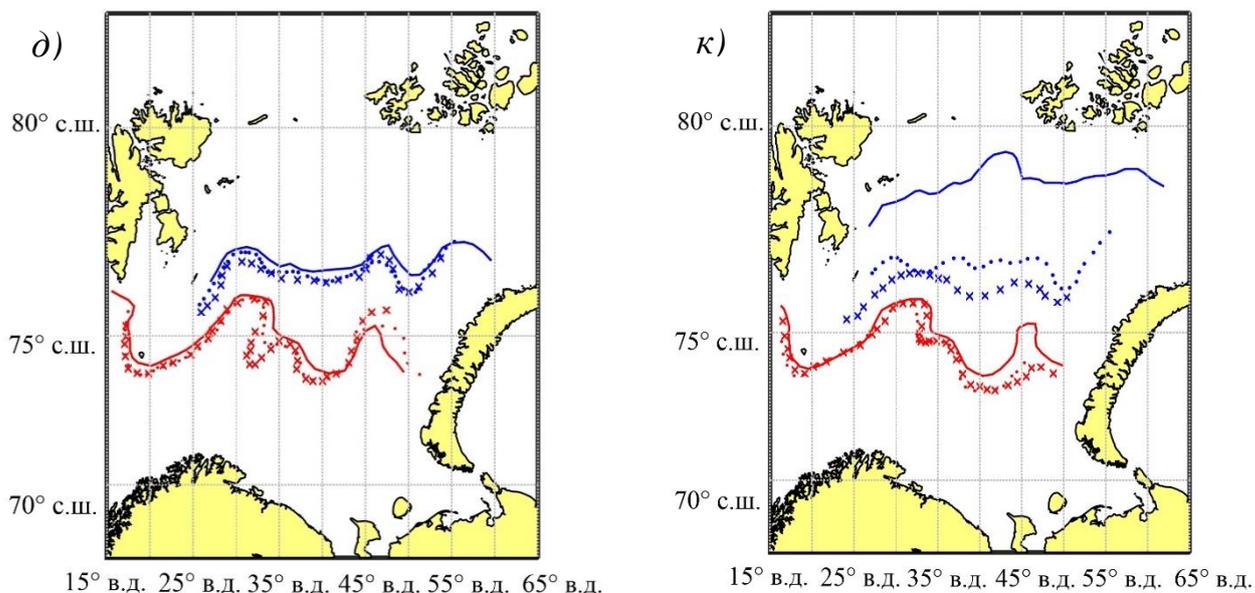


Рисунок 20. Декадная схема расположения Прикромочного и Полярного фронтов (сплошная линия – 1 декада; точка – 2 декада; крест – 3 декада) на акватории Баренцева моря за 2007 (а – июнь; б – июль; в – август; г – сентябрь; д – октябрь) и 2011 (е – июнь; ж – июль; з – август; и – сентябрь; к – октябрь) года

Для Прикромочного фронта внутримесячная динамика в оба рассматриваемых года максимальна в июле на всем протяжении фронта. Всего за одну декаду положение фронта может меняться на 250 – 300 км. Столь значительная динамика происходит на фоне формирующегося приповерхностного пикноклина [12] в условиях совместного влияния адвекции, радиационного прогрева и воздействия ветра. В августе внутримесячная динамика фронта значительно слабее и проявляется в незначительном изменении его положения. В июле и октябре месяце наблюдается самая интенсивная динамика Прикромочного фронта, связанная с интенсивным прогревом водной толщи в начале летнего сезона и резким выхолаживанием в конце сезона.

Внутримесячная изменчивость положения Полярного фронта в 2007 и 2011 годах характеризуется значительной динамикой в июле месяце в восточной части моря. За счет адвекции теплых атлантических вод фронт

смещается с июня по август на 300–400 км к Новой Земле, сохраняя свою стабильность в западной части. Максимальная изменчивость положения фронта за декаду отмечается в июле 2007 года, когда наблюдалось его смещение на 150 км к северу. В остальном декадные положения фронта отражают меандрирующий характер его динамики в течение всего летнего сезона. Смещения фронта за декаду составляет несколько десятков километров за декаду и, вероятно, связаны с динамическим воздействием ветра.

Стоит отметить, что внутрисезонная изменчивость положений обоих рассматриваемых фронтов сопоставима с их декадной изменчивостью в июле. В остальные месяцы она проявляется в виде смещения положений на несколько десятков километров и образовании языков и меандров.

3.2. Оценка количественных характеристик Прикромочной и Полярной фронтальных зон

Количественные характеристики Прикромочной фронтальной зоны за 2007 и 2011 года представлены в таблице 1–2. Средняя ширина фронтальной зоны рассчитывалась путём осреднения данных, полученных на трех меридиональных разрезах ТПМ. Из этих же данных производился выбор оценки средне–фронтального и максимального градиента ТПМ во фронтальной зоне. Дополнительно в таблице указан тип термической структуры.

Таблица 1. Количественные характеристики со среднедекадной изменчивостью Прикромочной фронтальной зоны в 2007 году.

Месяц	№ Декады	Прикромочная			
		Средняя ширина, км	Характер ФЗ, количество ФЗ	Средне–фронтальный градиент, °С/км	Максимальный градиент, °С/км
6	1	67	Ступенчатый, 3	0,024	0,031
	2	89	Ступенчатый, 2	0,02	0,028
	3	84	Ступенчатый, 3	0,019	0,021
7	1	78	Ступенчатый, 3	0,032	0,038
	2	67	Ступенчатый, 2	0,024	0,03
	3	111	Ступенчатый, 3	0,017	0,023
8	1	83	Ступенчатый, 2	0,016	0,024
	2	75	Ступенчатый, 2	0,018	0,019
	3	95	Ступенчатый, 2	0,012	0,014
9	1	67	Ступенчатый, 3	0,02	0,023
	2	78	Ступенчатый, 3	0,018	0,023
	3	95	Ступенчатый, 3	0,013	0,021

10	1	75	Ступенчатый, 2	0,019	0,027
	2	89	Ступенчатый, 2	0,035	0,045
	3	75	Ступенчатый, 2	0,052	0,068
Сред. за год		82	–	0,033	0,029

Таблица 2. Количественные характеристики со среднедекадной изменчивостью Прикромочной фронтальной зоны в 2011 году.

Месяц	№ Декады	Прикромочная			
		Средняя ширина, км	Характер ФЗ, количество ФЗ	Средне– фронтальный градиент, °С/км	Максимальный градиент, °С/км
6	1	56	Ступенчатый, 3	0,029	0,043
	2	64	Ступенчатый, 3	0,022	0,029
	3	98	Ступенчатый, 3	0,011	0,02
7	1	98	Ступенчатый, 4	0,014	0,017
	2	81	Ступенчатый, 2	0,014	0,016
	3	109	Ступенчатый, 3	0,013	0,015
8	1	103	Ступенчатый, 2	0,013	0,015
	2	103	Ступенчатый, 2	0,013	0,021
	3	95	Ступенчатый, 2	0,012	0,029
9	1	78	Ступенчатый, 3	0,011	0,031
	2	100	Ступенчатый, 3	0,015	0,025
	3	78	Ступенчатый, 2	0,018	0,02
10	1	89	Ступенчатый, 2	0,015	0,02
	2	59	Ступенчатый, 2	0,017	0,022
	3	86	Ступенчатый, 2	0,029	0,032
Сред. за год		86	–	0,024	0,024

Максимальная ширина Прикромочной фронтальной зоны за отмеченные аномально жаркие годы составляет 111 км, а максимальный градиент 0,068 °С/км. Ширина Прикромочной фронтальной зоны в среднем была почти в 1,5 раза меньше, чем Полярной. Она наиболее интенсивно варьировалась за декаду в июле 2007 года в районе 40 км. Это, вероятнее всего, связано с интенсивным таянием ледового покрова. При этом отмечалось значительное изменение положения Прикромочного фронта. Минимальные ширина фронтальной зоны наблюдалась в начале июня в оба года в период стабильного положения Прикромочного фронта. Изменение интенсивности градиента ТПМ внутри фронтальной зоны имело четко выраженную внутрисезонную изменчивость. Максимальные градиенты ТПМ наблюдались в начале и конце сезона, а минимальные – в июле и августе. Минимальные градиенты наблюдались в период максимальной изменчивости положения Прикромочного фронта. Преобладающий тип термической структуры – ступенчатый, максимальное количество зафиксированных фронтальных разделов за оба года – 4.

Количественные характеристики Полярной фронтальной зоны за 2007 и 2011 года представлены в таблице 3–4.

Таблица 3. Количественные характеристики со среднедекадной изменчивостью Полярной фронтальной зоны в 2007 году.

Месяц	№ Декады	Полярная			
		Средняя ширина, км	Характер ФЗ, количество ФЗ	Средне– фронтальный градиент, °С/км	Максимальный градиент, °С/км
6	1	122	Ступенчатый, 4	0,025	0,034
	2	122	Ступенчатый, 5	0,035	0,047
	3	146	Ступенчатый, 5	0,031	0,047
7	1	172	Ступенчатый, 6	0,027	0,047
	2	139	Ступенчатый, 6	0,031	0,038
	3	136	Ступенчатый, 5	0,027	0,033

8	1	142	Ступенчатый, 7	0,034	0,046
	2	114	Ступенчатый, 5	0,038	0,045
	3	153	Ступенчатый, 4	0,03	0,041
9	1	116	Ступенчатый, 4	0,029	0,042
	2	102	Ступенчатый, 5	0,028	0,044
	3	105	Ступенчатый, 6	0,021	0,031
10	1	117	Ступенчатый, 6	0,019	0,025
	2	113	Ступенчатый, 5	0,019	0,028
	3	103	Ступенчатый, 4	0,019	0,028
Сред. за год		126	–	0,027	0,038

Таблица 4. Количественные характеристики со среднедекадной изменчивостью Полярной фронтальной зоны в 2011 году.

Месяц	№ Декады	Полярная			
		Средняя ширина, км	Характер ФЗ, количество ФЗ	Среднефронтальный градиент, °С/км	Максимальный градиент, °С/км
6	1	103	Ступенчатый, 8	0,039	0,062
	2	100	Ступенчатый, 8	0,046	0,061
	3	111	Ступенчатый, 9	0,033	0,048
7	1	132	Ступенчатый, 7	0,03	0,037
	2	158	Ступенчатый, 6	0,026	0,033
	3	170	Ступенчатый, 6	0,026	0,029
8	1	152	Ступенчатый, 6	0,023	0,034
	2	105	Ступенчатый, 5	0,036	0,052
	3	102	Ступенчатый, 5	0,037	0,057
9	1	147	Ступенчатый, 4	0,025	0,039
	2	114	Ступенчатый,	0,034	0,05

			5		
	3	100	Ступенчатый, 4	0,03	0,043
10	1	97	Ступенчатый, 9	0,035	0,046
	2	89	Ступенчатый, 7	0,031	0,043
	3	86	Ступенчатый, 8	0,03	0,04
Сред. за год		117	–	0,048	0,045

Максимальная ширина Полярной фронтальной зоны за отмеченные anomalно жаркие годы составляет 172 км, а максимальный градиент $0,062^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Ширина фронтальной зоны наиболее значительно колебалась в 2011 году от 86 до 170 километров, когда положение Полярного фронта было стабильнее, чем в 2007 году. Изменение ширины фронтальной зоны за декаду в июле – августе достигало 40–50 км. В июне и октябре изменения ширины фронтальной зоны незначительные. Изменение интенсивности градиента ТПМ внутри фронтальной зоны не имеет четко выраженной внутрисезонной цикличности и, как правило, составляет всего $0,01^{\circ}\text{C}/\text{км}$ за декаду. Максимальные градиенты внутри фронтальной наблюдались, когда ширина и положение основного фронта были наиболее стабильны. Преобладающий тип термической структуры – ступенчатый, максимальное количество зафиксированных фронтальных разделов – 9.

В динамике ширины обеих фронтальных зон прослеживается четко выраженный внутрисезонный ход. Максимальная ширина наблюдается в июле – августе, а минимальная в начале и конце теплого сезона. Максимальные градиенты ТПМ отмечались в период, когда ширина фронтальной зоны менялась незначительно, а положение основных фронтальных разделов было близко к стационарному.

Заключение по разделу

В Баренцевом море в результате проведенной работы получены оценки характеристик на внутрисезонном интервале осреднения Полярной и Прикромочной фронтальных зон и их основных фронтов в теплый период года.

Средний градиент температуры при декадном осреднении данных внутри Полярной фронтальной зоны составляет $0,04$ °C/км, при ширине около 120 км. В Прикромочной фронтальной зоне – немного менее $0,03$ °C/км при ширине около 80 км. В годы с минимальным ледовым покровом обнаружено незначительное смещение Полярного фронта от климатического положения за теплый сезон, в то время как Прикромочный фронт сместился к северу на 250 км.

В июле у обоих фронтов отмечается пик внутримесячной динамики, очевидно, под влиянием синоптических процессов, адвекции тепла течениями и таяния льда, на фоне формирующегося приповерхностно пикноклина. В другие месяцы синоптическая динамика выражается в меандрировании положения фронтов до нескольких десятков километров.

Установлено, что градиенты ТПМ в районе фронтальных зон Баренцева моря в среднем в 2–4 раза превышает его климатическое значение для всего моря. В динамике ширины обоих фронтальных зон прослеживается четко выраженный внутрисезонный ход. Максимальные градиенты ТПМ во фронтальных зонах прослеживаются в условиях минимальной динамики положения основных фронтальных разделов.

Глава IV. Положение фронтов и характеристики фронтальных зон в Карском море

4.1. Положение и динамика фронтальных разделов в теплый сезон

Для описания изменчивости градиента на поверхности Карского моря на рис.20 (а; в) в качестве примера представлены две карты градиентов температуры Карского моря за август 2007 и 2011 года.

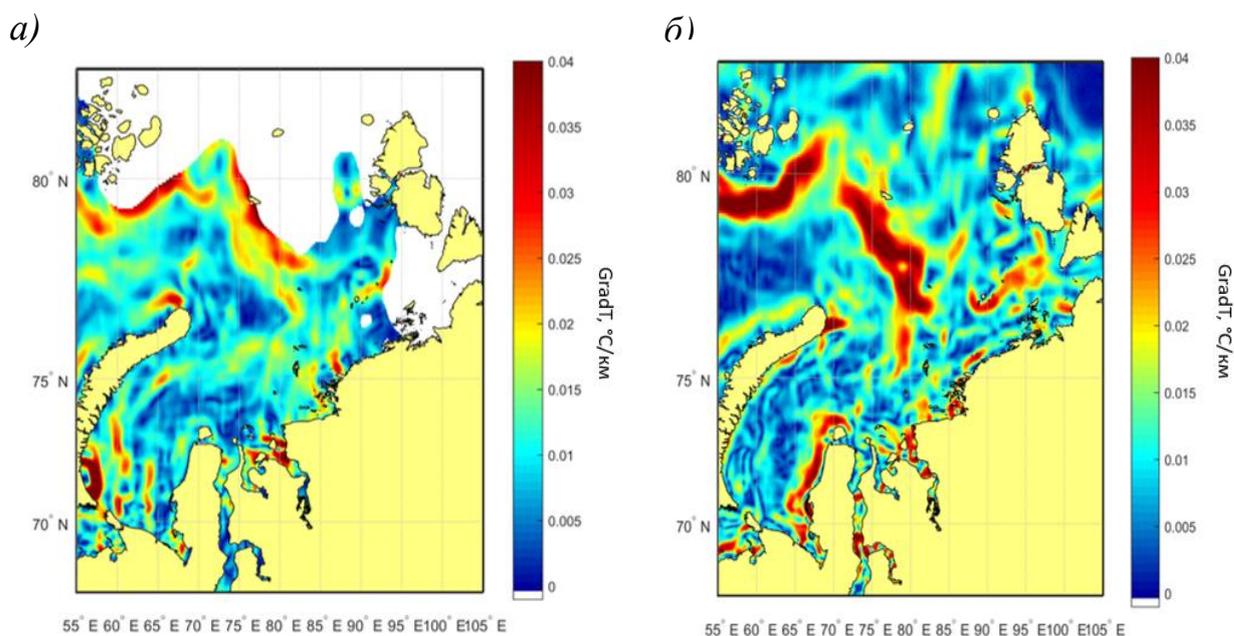


Рисунок 20. Распределение градиента температуры поверхности на акватории Карского моря в августе 2007 (а) и 2011 (б) года

Сравнивая оба года, можно хорошо проследить основные зоны высокого значения градиента ТПМ – северная и северо-западная часть Карского моря, район о. Визе и о. Земли Франца–Иосифа. Интенсивные градиенты также отмечаются у материковой западной части Карского моря. В 2011 году более

ярко выражены центральные зоны, нежели в 2007. Например, градиент в центральной части Карского моря недалеко от о. Новой Земли прибрежной фронтальной зоны около о. Новой Земли в 2007 году меньше на $0,02^{\circ}\text{C}/\text{км}$, по сравнению с 2011 годом. В целом на акватории моря максимальный градиент отмечается в районе о. Земли Франца Иосифа – $0,04^{\circ}\text{C}/\text{км}$. В среднем градиент на акватории моря составляет порядка $0,005^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Стоит также отметить, что интенсивность градиента очень сильно разнится в зависимости от сезона. Однако названные ранее районы с интенсивным градиентом в целом стационарны.

Анализируя все полученные среднемесячные и среднедекадные карты градиентов в Карском море, удалось установить, что Прикромочная фронтальная зона имеет в основном незначительные градиенты температуры. Однако, в северных районах Карского моря, возле о. Визе и о. Земли Франца Иосифа значение градиента может достигать от $0,05^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Вклад в изменчивость градиента вносит значительная динамика ледового покрова, так как в августе месяце воды Карского моря прогреваются и начинается активное таяние льдов.

Максимальные градиенты Стоковой фронтальной зоны отмечаются около материковой части Карского моря и недалеко от о. Новая Земля. Градиенты температуры поверхности Карского моря в названных районах могут достигать $0,05^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Основной вклад в интенсивность градиента вносят теплые речные воды, смешивающиеся с холодными карскими водами [22].

В результате анализа графиков распределения температуры поверхности моря за 2007 и 2011 года в Карском море, в зависимости от месяца в сезоне удалось выделить от 2 до 4 фронтов внутри Прикромочной фронтальной зоны и от 3 до 7 фронтов внутри Стоковой фронтальной зоны.

Результаты выделения среднемесячного положения Прикромочного и Стокового фронтов Карского моря в 2007 и 2011 годах представлены на рис.21.а–б. Так как фронтальная зона имеет значительное число фронтальных

разделов, на картах для удобства отмечается основной фронт внутри фронтальной зоны

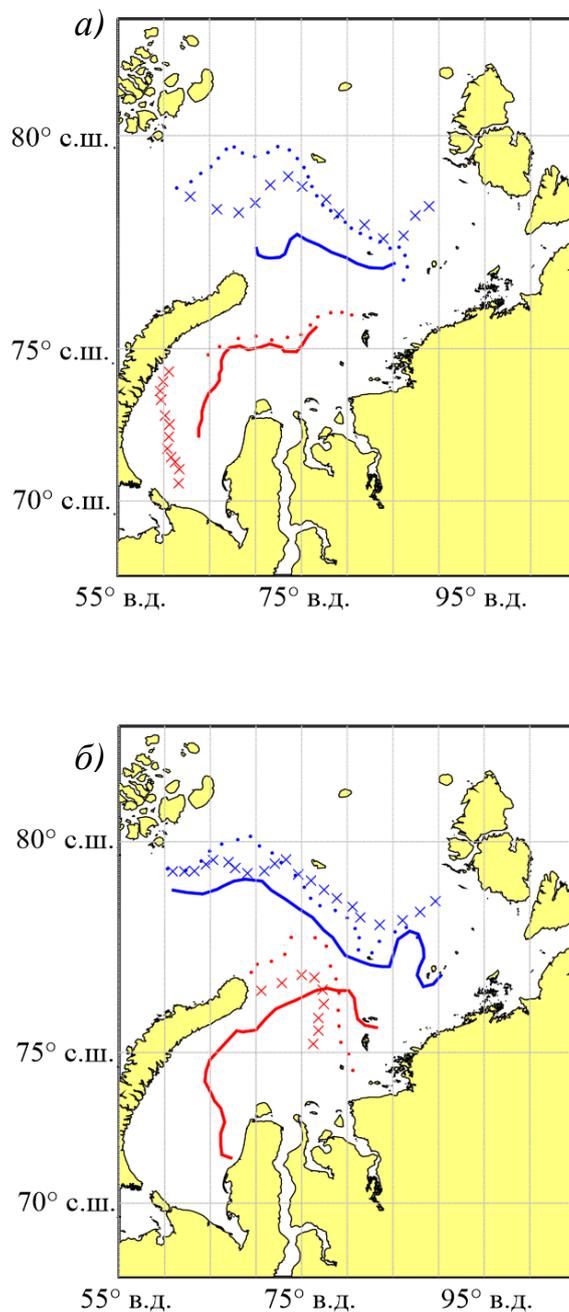
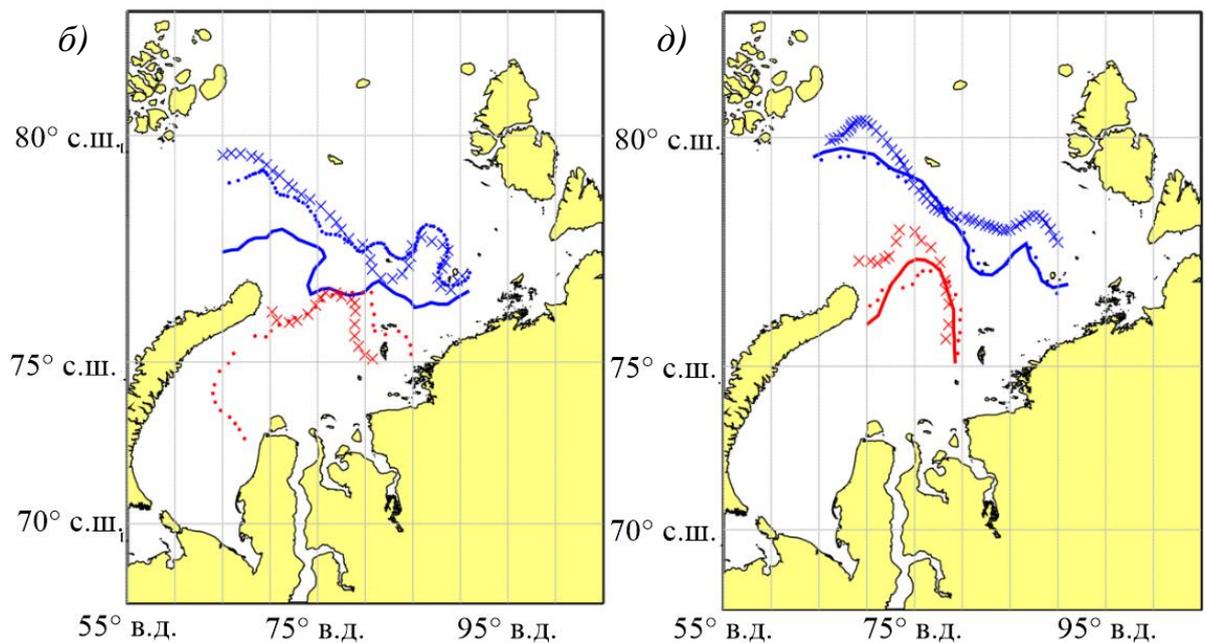
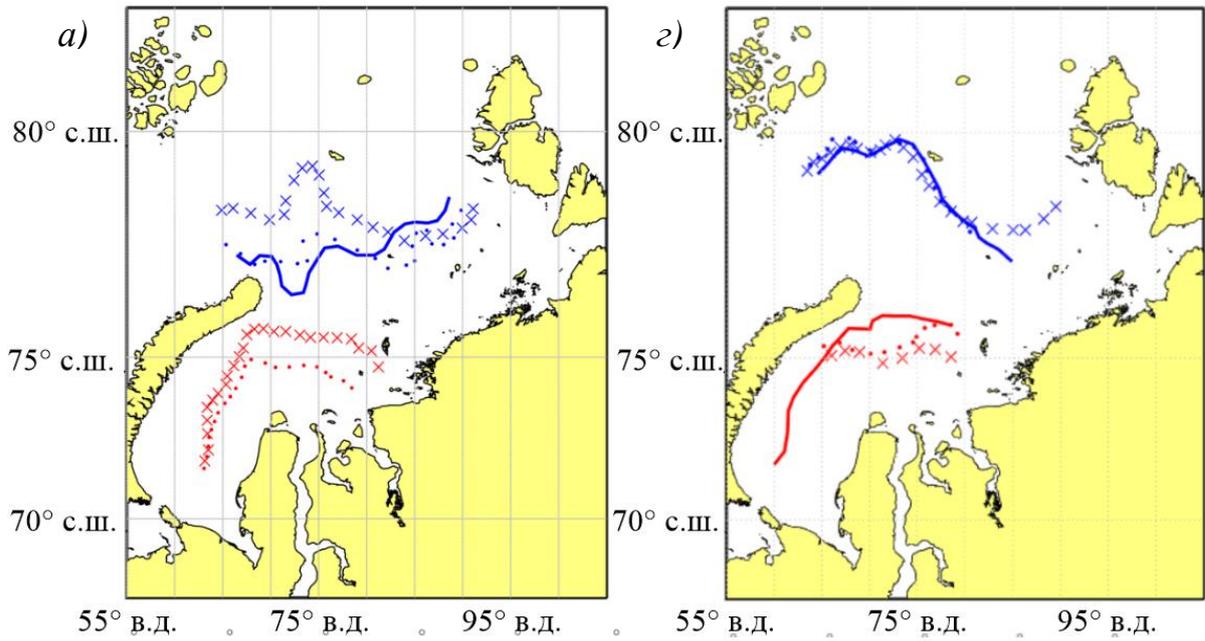


Рисунок 21. Среднемесячные карты положений Прикромочного (сплошная линия – июль; точки – август; кресты – сентябрь) и Стокового фронтов (сплошная линия – июль; точки – август; кресты – сентябрь) за 2007 (а) и 2011 (б) годы

Сравнивая динамику изменчивости положений Прикромочного фронта в оба года, представленную на рис.21.а–б, можно сказать, что фронт интенсивнее смещается на север Карского моря в 2007 году, нежели в 2011. В 2007 году основной фронт Прикромочной фронтальной зоны динамично перемещается по всей северной части Карского моря, а в 2011 году наоборот отмечается практически его квазистационарное положение. Скорее всего, это связано с положением кромки арктического льда, сокращение которой значительно повлияло на динамику изменчивости фронта в 2007 году. В 2011 году кромка льда подвержена меньшей пространственной изменчивости, и, как следствие, Прикромочный фронт не имеет значительной динамики [36]. Общая тенденция смещения фронта на север наблюдается в оба года. Отмечается также схожесть положения фронта в районе о. Визе в августе месяце в 2007 и 2011 гг. Интенсивность изменчивости фронта больше в 2007 г., нежели в 2011 г. Возможно, это связано с усиленным поверхностным прогревом и ветровой динамикой [37].

В источнике [23] представлено описание типов распределения речных вод, основная причина которых кроется в гидрометеорологических условиях, влияющих на экмановский перенос. В результате с июля по сентябрь 2007 и 2011 годов по [23] Стоковая фронтальная зона имеет характер распределения, соответствующий западному типу речных вод. В работе [25] с помощью контактных наблюдений в сентябре и в источнике [22] в июле 2011 года подтверждаются положения выделенного Стокового фронта. Область изменчивости фронта в 2007 году больше, чем в 2011. Это может быть связано с интенсивностью распространения речного стока. Общая тенденция смещения фронта на север отмечается в оба года. Стоит отметить интенсивную динамику в сентябре 2007 года, которая связана с выхолаживанием поверхности вод [38]. Исследуемые фронтальные зоны за сезон перемещаются на сотни километров, что дает возможность сделать вывод об их нестационарном положении на акватории Карского моря.

Представления о внутримесячной динамике можно получить на примере карт (рис.22. а–е) среднедекадных положений Прикромочного и Стокового фронтов за теплый сезон 2007 и 2011 годов.



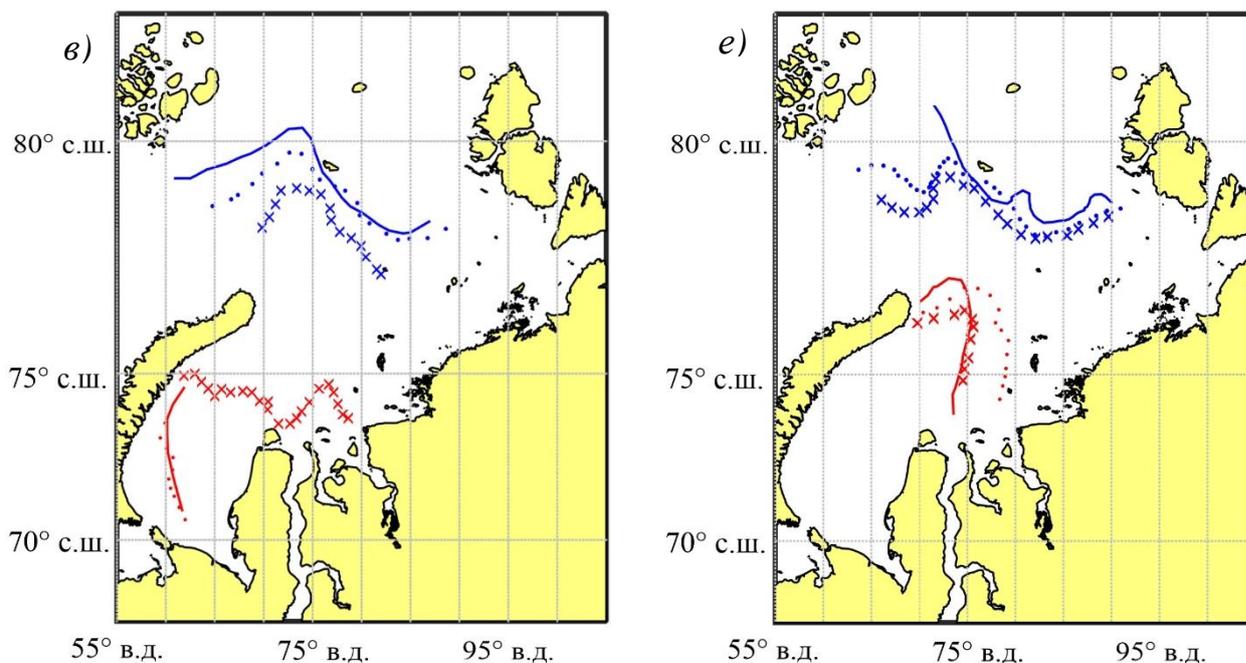


Рисунок 22. Декадная схема расположения Прикромочного и Стоковского фронтов (сплошная линия – 1 декада; точка – 2 декада; крест – 3 декада) на акватории Карского моря за 2007 (а – июль; б – август; в – сентябрь) и 2011 (а – июль; б – август; в – сентябрь) года

Для Прикромочного фронта внутримесячная изменчивость максимальна в сентябре на всем протяжении фронта. За одну декаду смещение фронта невелико и составляет порядка 20–30 км и, возможно, связано с воздействием ветра [37] и незначительной изменчивостью градиента ТПМ. В июле – августе внутримесячная динамика фронта характеризуется малой интенсивностью в сравнении с сентябрем. Внутрисезонная изменчивость Прикромочного фронта в целом совпадает с внутримесячной за оба рассматриваемых года.

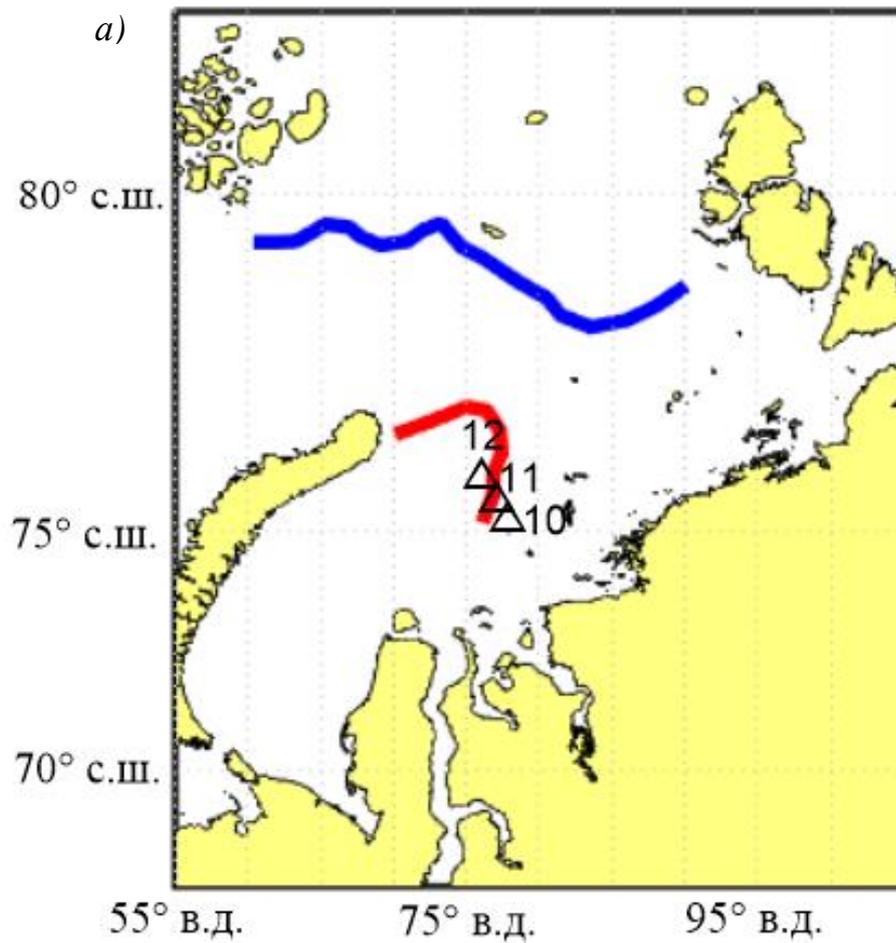
Внутримесячная изменчивость положения Стоковского фронта характеризуется значительной динамикой в августе за счет интенсивного выноса теплых речных вод в Карское море в оба года. За декады с июля по август 2007 года фронт смещается на 100–150 км к северной части архипелага Новая Земля. Максимальная изменчивость положения фронта за декаду отмечается в августе 2007 года, когда наблюдалось его смещение на 100 км к югу, что может быть связано с ветровым воздействием. Внутрисезонная

изменчивость фронта за 2011 год, незначительна и составляет не более 100 км к северу.

В целом декадные положения Стокового фронта отражают тип центрального [23] распределения речных вод в течение всего летнего сезона в оба года. Среднемесячные положения Стокового фронта близки к среднедекадным только в 2011 году.

Регистрация фронта по контактным измерениям

Полученные в ходе проведенной работы результаты удалось сравнить с данными контактных измерений 59-ой экспедиции НИС «Академик Мстислав Келдыш», проходящей в Карском море в сентябре 2011 года. На рис. 24 представлена карта Прикромочного и Полярного фронта за сентябрь 2011 года и один из разрезов экспедиции, проходящей поперек Стокового фронта.



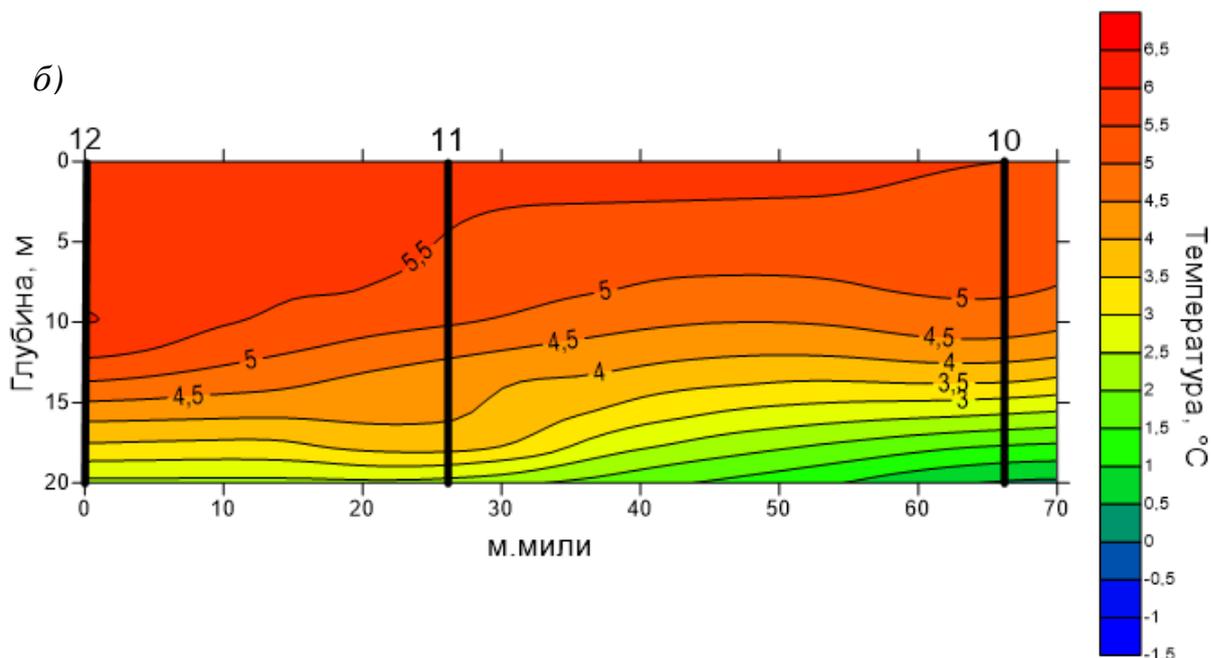


Рисунок 23. Среднемесячное положение фронтальных зон в Карском море в сентябре 2011 года (а), треугольниками указаны станции 59 экспедиции НИС «Мстислав Келдыш»; вертикальный разрез температуры (б) с указанием станций, проходящих вдоль Стокового фронта.

Анализируя контактные данные, полученные в ходе измерений, удалось построить разрез, выполненный в сентябре 2011 года в центральной части Карского моря, недалеко от о-в Арктического института. Положение разреза пересекает среднемесячное положение Стокового фронта.

Как можно видеть из рисунка 23 (б), колебания температуры в районе разреза варьировались от 1 до 6,5°C на глубине от 0 до 20 м. Как можно видеть, заметно уменьшение температуры поверхности с северо-запада на юго-восток. В районе 12 станции температура в слое от 0 до 12 м составляет более 5,5°C, а в районе 10 температура 5,5°C фиксируется лишь на поверхности. На глубине 20 метров в районе 12 станции температура составляет 3,5°C, а в районе 10 0,5°C. В результате в области 11 станции наблюдается перемешивание холодных карских и теплых речных вод, особенно заметен резкий скачок на 0,5°C на глубине 5 м. В результате на разрезе в районе 10-12 станции зафиксирована фронтальная зона, разъединяющая воды с разным температурным режимом.

Сравнивая количественные характеристики, можно сказать, что по контактными данным ширина фронтальной зоны составляет 129 км, а градиент составляет $0,02^{\circ}\text{C}/\text{км}$, а по экспериментальным данным ширина фронтальной зоны составляет 127 км при градиенте в $0,03^{\circ}\text{C}/\text{км}$ в сентябре 2011 года.

Таким образом, сравнив положение и количественные характеристики Стокового фронта по контактными измерениями, выполненными в ходе 59-ой экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш» и экспериментальными данными, представленными в работе, за сентябрь 2011 года удалось выяснить, что они совпадают.

4.2. Оценка количественных характеристик Прикромочной и Стоковой фронтальных зон

Количественные характеристики Прикромочной фронтальной зоны за 2007 и 2011 года представлены в таблице 5–6. Средняя ширина фронтальной зоны рассчитывалась путём осреднения данных, полученных на трех меридиональных разрезах ТПМ. Из этих же данных производился выбор оценки средне–фронтального и максимального градиента ТПМ во фронтальной зоне. Дополнительно в таблице указан тип термической структуры.

Таблица 5. Количественные характеристики со среднедекадной изменчивостью Прикромочной фронтальной зоны в 2007 году.

Месяц	№ Декады	Прикромочная			
		Средняя ширина, км	Характер ФЗ, количество ФЗ	Средне–фронтальный градиент, °С/км	Максимальный градиент, °С/км
7	1	109	Ступенчатый, 3	0,021	0,025
	2	114	Ступенчатый, 2	0,02	0,026
	3	121	Ступенчатый, 3	0,02	0,021
8	1	108	Ступенчатый, 2	0,019	0,021
	2	128	Ступенчатый, 2	0,022	0,029
	3	117	Ступенчатый, 2	0,027	0,032
9	1	91	Ступенчатый, 3	0,024	0,033
	2	–	–	–	–
	3	106	Ступенчатый, 3	0,024	0,021
Сред. за год		111	–	0,022	0,026

Таблица 6. Количественные характеристики со среднедекадной изменчивостью Прикромочной фронтальной зоны в 2011 году.

Месяц	№ Декады	Прикромочная			
		Средняя ширина, км	Характер ФЗ, количество ФЗ	Средне-фронтальный градиент, °С/км	Максимальный градиент, °С/км
7	1	107	Ступенчатый, 4	0,023	0,027
	2	98	Ступенчатый, 2	0,021	0,024
	3	90	Ступенчатый, 3	0,024	0,031
8	1	94	Ступенчатый, 2	0,029	0,033
	2	84	Ступенчатый, 2	0,024	0,028
	3	97	Ступенчатый, 2	0,02	0,021
9	1	111	Ступенчатый, 3	0,02	0,022
	2	96	Ступенчатый, 3	0,029	0,035
	3	103	Ступенчатый, 2	0,03	0,032
Сред. за год		97	–	0,024	0,028

Максимальная средняя ширина Прикромочной фронтальной зоны за отмеченные годы составляет 128 км, а максимальный градиент 0,035 °С/км. Ширина Прикромочной фронтальной зоны в среднем меньше на 30–40 км в сравнении со Стоковой фронтальной зоной. Декадная изменчивость ширины фронтальной зоны в июле–августе достигала 15 км, а в сентябре до 10 км. Формирование данной фронтальной зоны связано как со значительной ветровой динамикой, так и с интенсивным таянием ледового покрова, поэтому изменчивость среднего максимального градиента фронта нестабильна. В результате затруднительно выявить общие закономерности, влияющие на его изменчивость в оба года по данным среднего градиента. Стоит лишь отметить, что в районах интенсивного таяния ледяного покрова в июле отмечаются максимальные градиенты ТПМ. Изменение интенсивности градиента ТПМ внутри фронтальной зоны отмечается в августе и сентябре, что может быть связано с динамическим воздействием ветра на область фронта. Стоит

отметить, что в данной фронтальной зоне зафиксирован только ступенчатый тип термической структуры, максимальное количество фронтальных разделов – 4.

Количественные характеристики Полярной фронтальной зоны за 2007 и 2011 года представлены в таблице 7 – 8.

Таблица 7. Количественные характеристики со среднедекадной изменчивостью Стоковой фронтальной зоны в 2007 году.

Месяц	№ Декады	Стоковая			
		Средняя ширина, км	Характер ФЗ, количество ФЗ	Средне– фронтальный градиент, °С/км	Максимальный градиент, °С/км
7	1	124	Ступенчатый, 6	0,026	0,029
	2	136	Ступенчатый, 6	0,028	0,034
	3	139	Ступенчатый, 5	0,024	0,029
8	1	148	Ступенчатый, 7	0,023	0,027
	2	162	Ступенчатый, 5	0,02	0,028
	3	172	Ступенчатый, 4	0,025	0,031
9	1	163	Ступенчатый, 4	0,021	0,024
	2	–	–	–	–
	3	134	Ступенчатый, 6	0,022	0,029
Сред. за год		147	–	0,023	0,028

Таблица 7. Количественные характеристики со среднедекадной изменчивостью Стоковой фронтальной зоны в 2011 году.

Месяц	№ Декады	Стоковая			
		Средняя ширина, км	Характер ФЗ, количество ФЗ	Средне– фронтальный градиент, °С/км	Максимальный градиент, °С/км
7	1	120	Ступенчатый, 4	0,023	0,035
	2	129	Ступенчатый, 3	0,023	0,028
	3	103	Ступенчатый,	0,026	0,03

			3		
8	1	114	Ступенчатый, 4	0,02	0,029
	2	149	Ступенчатый, 3	0,022	0,027
	3	158	Ступенчатый, 2	0,019	0,025
9	1	144	Ступенчатый, 2	0,025	0,031
	2	127	Ступенчатый, 4	0,022	0,027
	3	100	Ступенчатый, 2	0,026	0,034
Сред. за год		127	–	0,022	0,029

Максимальная средняя ширина Стоковой фронтальной зоны за отмеченные годы составляет 172 км, а максимальный градиент 0,035 °С/км. Наибольшая изменчивость ширины фронтальной зоны отмечается в 2011 году от 100 до 158 км. Внутрисезонная изменчивость ширины фронтальной зоны в июле–августе достигало 35–50 км. В сентябре изменчивость ширины между декадами составляет более 50 км. В изменчивости градиента ТПМ внутри фронтальной зоны имеется общая тенденция снижения его значений к середине сезона и увеличения в начале и конце сезона. Это может быть связано со значительным влиянием речного стока и интенсивным прогревом водной толщи в теплый период. Максимальные градиенты ТПМ зафиксированы в июне, когда происходит формирование Стоковой фронтальной зоны за счет взаимодействия теплых модифицированных речным стоком вод и холодных, соленых морских вод. Максимальные градиенты ТПМ в сентябре связаны с интенсивным выхолаживанием морских вод и сохранением последующим образованием холодного квазиоднородного слоя на акватории моря. Стоит отметить, что в данной фронтальной зоне зафиксирован только ступенчатый тип термической структуры, максимальное количество фронтальных разделов – 7.

В динамике ширины обеих фронтальных зон присутствует внутрисезонный ход, связанный с распространением речных вод и интенсивностью таяния ледового покрова. Максимальная ширина наблюдается в августе, что в основном связано с климатическими особенностями Карского

моря. Максимальные градиенты ТПМ отмечались в устойчивых фронтальных разделах, которые в целом были близки к стационарным.

Заключение по разделу

В Карском море в результате работы получены внутрисезонные осредненные оценки характеристик Прикромочной и Стоковой фронтальных зон в теплый период года.

Средний градиент температуры при декадном осреднении данных внутри Стоковой фронтальной зоны составляет $0,029$ °С/км, при ширине около 137 км. В Прикромочной фронтальной зоне – $0,027$ °С/км при ширине около 104 км. Показано, что градиенты ТПМ в районе фронтальных зон Карского моря незначительны, а по данным ширины фронтальных зон установлено существование внутрисезонного хода динамики изменчивости фронтов на акватории моря. Отмечаются максимальные градиенты ТПМ во фронтальных зонах в условиях минимальной динамики положения основных фронтальных разделов. В рассматриваемые годы установлен западный тип распространения речных вод, с которым связан Стоковый фронт.

Контактные измерения подтверждают местоположение выделенного с помощью ассимилированных данных Стокового фронта в августе и сентябре. Стоит отметить, что особенностью выделения Стокового фронта является получение его местоположения по данным ТПМ, а не по данным солености или хлорофиллу «а». В сентябре у Прикромочного, а в августе у Стоковых фронтов отмечается пик внутрисезонной изменчивости положения, очевидно связанный с процессами синоптического характера, таянием арктического льда и ветровой динамикой.

В результате обработки экспедиционных данных научно-исследовательской экспедиции №59 на НИС «Академик Мстислав Келдыш» зафиксированные фронтальные зоны на втором разрезе совпадают с положением Стокового среднемесячного фронта в сентябре 2011 года, выделенным по представленной в работе методике.

Заключение

В ходе работы предпринята попытка систематического описания особенностей внутримесячной и внутрисезонной динамики фронтальных зон Баренцева и Карского морей в годы с минимальной площадью ледового покрова.

В результате проведенной работы рассчитаны поля градиентов для среднемесячных и декадных данных ТПМ. Построенные для безледного периода среднемесячные и декадные композитные карты, сочетающие распределения ТПМ и градиентов температуры.

Детектированы положения основным фронтальных разделов внутри фронтальных зон на основе меридиональных разрезов. В Баренцевом море – Прикромочная фронтальная зона, находящаяся в северной части моря и Полярная фронтальная зона, находящаяся в южной части моря. В Карском море – Прикромочная фронтальная зона в северной части моря, Стоковая фронтальная зона – в центральной части моря.

Произведен расчет количественных характеристик изменчивости температуры в районах фронтальных зон. Средний градиент температуры при декадном осреднении данных внутри Полярной фронтальной зоны составляет $0,04$ °С/км, при ширине около 120 км. В Прикромочной фронтальной зоне – немного менее $0,03$ °С/км при ширине около 80 км. Средний градиент температуры при декадном осреднении данных внутри Стоковой фронтальной зоны составляет $0,029$ °С/км, при ширине около 137 км. В Прикромочной фронтальной зоне – $0,027$ °С/км при ширине около 104 км.

Описано положение и динамика фронтальных разделов в теплый сезон. Оценены количественные характеристики фронтальных зон разного генезиса.

Сравнивая фронтальную динамику Баренцева и Карского морей, можно сказать, что фронтальные зоны Баренцева моря имеют большие градиенты температур и ширину, а значит являются более интенсивными, чем в Карском

море. На фронтальные зоны Баренцева моря воздействует множество важных факторов, таких как мощные теплые и холодные течения, ветровая динамика и солнечная активность. Стоит упомянуть, что Баренцево море в больший промежуток времени открыто от льдов, чем Карское. В результате фронтальные зоны Баренцева моря можно идентифицировать с июня по октябрь, а в Карском море лишь с июля по сентябрь.

В тоже время, в Карском море уникальны каждая из двух выделенных фронтальных зон. Стоковую фронтальную зону теперь возможно выделять не только по солености или хлорофиллу «а», но и по температуре вод. Особенностью Прикромочной фронтальная зона в Карском море является то, что её впервые удалось выделить на акватории моря. При этом, градиенты и ширина фронтальных зон в Карском море значительно ниже, чем в Баренцевом море. Поэтому фронтальные зоны Карского моря гораздо сложнее идентифицировать на акватории по температуре поверхности моря.

Представленные материалы свидетельствуют о наличии сложной внутримесячной динамики фронтальных зон в Карском и Баренцево море. Однако все эти данные относятся к поверхностному слою и сами по себе не дают возможности обоснованно судить о том, насколько глубоко проникают те или иные процессы в водную толщу. Непосредственное выявление процессов, ответственных за наблюдаемое распределение гидрологических параметров на поверхности моря, требует проведения глубоководных измерений

Дальнейшее развитие исследований предполагается направить на сравнение положения и динамики фронтальных зон в Баренцевом и Карском морях в условиях минимальной и максимальной ледовитости Арктики.

Список литературы

1. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф. Изменение климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. №1(103). С. 32–41.
2. Баранов Е.И. Средние месячные положения гидрологических фронтов северной части Атлантического океана // Океанология. 1972 Т.12. №2 С. 217–224
3. Грузинов В.М. Гидрология фронтальных зон Мирового океана // Л.: Гидрометеиздат. 1986. 272 с.
4. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. // Л.: Гидрометеиздат. 1983. 296 с.
5. Платонов Н.Г., Мордвинцев И.Н., Рожнов В.В., Алпацкий И.В. Анализ состояния ледового покрова Арктики в период летнего минимума 2011 г. // Исследование Земли из космоса. 2012. № 4. С.12.
6. Зацепин А.Г., Морозов Е.Г., Пака В.Т., Демидов А.Н., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Поярков С.Г., Соловьев Д.М. Циркуляция вод в юго–западной части Карского моря в сентябре 2007 г. Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С.683–697.
7. Флинт М.В., Поярков С.Г., Соловьев К.А. Мезопланктон в области континентального склона в Карском море // Материалы научной конференции «Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований». Москва, 27–29 мая 2015 года. М.: АПР, 2015 С.129–134.
8. GHRSSST. Overview. Information about group and working model.[Электронный ресурс]/Содержит информацию о продукте – Режим доступа: <https://www.ghrsst.org> – свободный. Загл. с экрана (дата обращения 20.04.2016).

9. Казьмин А.С. Структура и изменчивость океанических фронтальных зон: анализ глобальной спутниковой информации. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук. Москва. 2014. 43 с.
10. Hill, A.E. Dynamics of tidal mixing fronts in the North Sea / A.E.Hill, I.D.James, P.F.Linden, J.P.Matthews, D.Prandle, J.H.Simpson, E.M.Gmitrowicz, D.A.Smeed, K.M.M.Lwiza, R.Durazo, A.D.Fox, D.G.Bowers // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. Phys. Sci. Eng.* 1993. V. 343(1669). P.431–446.
11. Kostianoy A.G., Nihoul J.C.J., Rodionov V.B. *Physical Oceanography of Frontal Zones in the Subarctic Seas*. Elsevier Oceanography Series, 2004. 316 p.
12. Гирдюк Г.В., Дженюк С.Л. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1. Баренцево море. Выпуск 1. Л.: Гидрометеоиздат. 1990. 280 с.
13. Николаев Ю.В., Макштас А.П., Иванов Б.В. К проблеме изучения Прикромочных зон Арктических морей // *Труды ААНИИ*. 1986. Т.406. С.131–138.
14. Голенко Н.Н., Зубин А.Б., Разживин В.А. Гидрологические условия в районе водораздела Норвежского, Гренландского и Баренцева морей летом 1985 года // *Структура гидрофизических полей Норвежского и Гренландского морей*, ред. М.:ИОАН. 1987. С.18–23.
15. Романенков Д.А., Зимин А.В., Родионов А.А., Атаджанова О.А., Козлов И.Е. Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9. № 1. С. 59–72.
16. Ожигин В.К., В.А. Ившин, А.Г. Трофимов, А.Л. Карсаков, М.Ю. Анциферов. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО, 2016. 216 с.

17. National snow and ice data center. [Электронный ресурс]/ Содержит информацию о продукте – Режим доступа: <http://nsidc.org> – свободный. Загл. с экрана.
18. Завьялов П.О., Ижницкий А.С., Осадчиев А.А., Пелевин В.В., Грабовский А.Б. Структура термохалинных и биооптических полей на поверхности Карского моря осенью 2011 года // Материалы научной конференции «Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований». Москва, 27–29 мая 2015 года. М.: АПР, 2015. С.15–18.
19. Завьялов П.О., Ижницкий А.С., Осадчиев А.А., Пелевин В.В., Грабовский А.Б. Структура термохалинных и биооптических полей на поверхности Карского моря осенью 2011 года // Материалы научной конференции «Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований». Москва, 27–29 мая 2015 года. М.: АПР, 2015. С.15–18.
20. Щука С.А., Кременецкий В.В., Недоспасов А.А., Очередник В.В. Характеристики термохалинного режима Карского моря // Материалы научной конференции «Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований». Москва, 27–29 мая 2015 года. М.: АПР, 2015. С.23–28.
21. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. Карское море. М.: Изд-во МГУ. 1982. 192 с
22. Гольдин Ю.А., Глуховец Д.И., Гончаренко И.В., Шатравин А.В. Распределение характеристик поверхностного слоя вод Карского моря в 2013 и 2014 годах по судовым и спутниковым наблюдениям // Материалы научной конференции «Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований». Москва, 27–29 мая 2015 года. М.: АПР, 2015. С.29–34.
23. Полухин А.А. Формирование гидрохимической структуры вод Карского моря под влиянием континентального стока. Дис. ... канд. Географических наук: 25.00.28. М. 2017. 149 с.

24. Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G. River plume dynamics in the Kara Sea from altimetry-based lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data // Remote sensing of environment. 2016. V.176. P. 177–187.
25. Мошаров С.А. Распределение первичной продукции и хлорофилла «а» в Карском море в сентябре 2007 г. Океанология. 2010. Т. 50. № 6. С.933–941.
26. Флинт М.В., Зацепин А.Г., Кучерук Н.В., Поярков С.Г., Римский–Корсаков Н.А. Комплексные исследования экосистемы Карского моря (54–й рейс научно–исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш»). Океанология. 2008. Т.48 №6. С. 947–951.
27. Кулаков М.Ю. О новом подходе к моделированию циркуляции вод Арктических морей. Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. №2. С.55–62.
28. Сергеева В.М., Суханова И.Н., Дружкова Е.И., Сажин А.Ф., Демидов А.Б., Мошаров С.А., Кременецкий В.В., Полухин А.С. Структура и распределение фитопланктона в глубоководных районах северной части Карского моря // Материалы научной конференции «Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований». Москва, 27–29 мая 2015 года. М.: АПР, 2015. С.111–115.
29. Жичкин А.П. Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // Вестник Кольского научного центра РАН – 2015. №1. С. 55–64.
30. Новицкий В.П. Постоянные течения северной части Баренцева моря // Труды ГОИН, 1961. Вып.64. С.3–32.
31. Уралов Н.С. О потере тепла Нордкапским течением в южной половине Баренцева моря // Труды ГОИН, 1963. Вып.73. С. 66–75.
32. Уралов Н.С. Об адвективной составляющей теплового баланса южной половины Баренцева моря // Труды ГОИН, 1961. Вып.55. С. 3–20.

33. Ожигин, В. К. О фронтальных зонах Баренцева моря / В. К. Ожигин // Вопросы промысловой океанологии Северного бассейна: Сб. науч. тр ПИНРО. – Мурманск, 1989. – С. 89–103.
34. Давидович В.А. Алгоритм автоматического распознавания температурных океанических фронтов. Океанология. 2014. Т.54. №1 С.105–112.
35. Pavlov, V. K. Hydrometeorological regime of the Kara, Laptev, and EastSiberian seas / V. K. Pavlov, L. A. Timokhov, G. A. Baskakov, M. Y. Kulakov, V. K. Kurazhov, P. V. Pavlov, S. V. Pivovarov, V. V. Stanovoy // Technical Memorandum APL–UW TM1–96, University of Washington. – P. 1996. 179 с.
36. Букатов А.Е., Букатов А.А. Изменчивость положения кромки морского льда в Арктике. Материалы научной конференции «Прикладные задачи математики». Севастополь. 2017. С.59–65.
37. Заболотских Е.В., Гурвич И.А., Шапрон Б. Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледового покрова. Исследование земли из космоса. 2015. №2. С.64.
38. Егоров А.Г. Долгосрочный прогноз устойчивого ледообразования в северо-восточной части Карского моря. Результаты испытания новых усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2011. №38 С.56–57.