

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН НА ПОВЕРХНОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ ПО ДАННЫМ КОНТАКТНОГО И ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА (2008—2018 гг.)

Д. В. Моисеев

Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН (Мурманск, Российская Федерация)

И. Ф. Запорожцев

Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, Мурманский арктический государственный университет (Мурманск, Российская Федерация)

Т. М. Максимовская, Г. Н. Духно

Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН (Мурманск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2018 г.

Представлен анализ положения и характеристик фронтальных зон Баренцева моря с 2008 по 2018 гг. по данным температуры поверхности моря при спутниковом зондировании и in situ (температура и соленость). Выполнены численные эксперименты для оценки информативности результатов применения двух методов идентификации фронтов. В районе Медвежинской возвышенности результаты методов хорошо согласованы для рассматриваемого периода.

Ключевые слова: Баренцево море, Полярная фронтальная зона, контактные и спутниковые данные.

Введение

Циркуляция Баренцева моря сложна и зависит от многих факторов: интенсивности притока вод из Северной Атлантики, рельефа дна, изменчивости ветрового поля над акваторией, а также от характера приливных сил. Взаимодействие теплых и соленых вод Атлантики с холодными распресненными арктическими образуют в Баренцевом море Полярную фронтальную зону (ПФЗ), положение и характеристики которой имеют большое значение при описании состояния природной среды. Значительное увеличение во фронтальных зонах (ФЗ) горизонтальных градиентов температуры и солености воды является причиной повышенной динамической активности, горизонтальных струйных течений и т. д. С этими зонами часто связаны районы высокой биологической продуктивности, здесь же могут происходить накопление и интенсивные горизонтальные и вертикальные переносы загрязняющих веществ [1—9].

Положение ПФЗ моря определяется рельефом дна, сезонным ледяным покровом, адвекцией атлантических вод и др. ПФЗ объединяет в себе систему фронтальных зон, обладающих различными характеристиками. Это вызвано также сложным рельефом дна, обуславливающим разделение основного потока вод Норвежского течения, а также взаимодействием морских вод с водами материкового стока. Согласно классификации, представленной в [6], в Баренцевом море можно выделить следующие основные фронтальные зоны, входящие в ПФЗ (рис. 1):

- медвежинская ФЗ (зона взаимодействия вод Медвежинского течения с водами Северной ветви Нордкапского течения);
- ФЗ периферии Западного желоба (зона взаимодействия Северной ветви Нордкапского течения с окружающими водами);
- прикромочные ФЗ (зоны взаимодействия линзы талых вод с окружающими водами);
- ФЗ района Центральной возвышенности (зона взаимодействия вод Центральной ветви Нордкапского течения с баренцевоморскими водами);

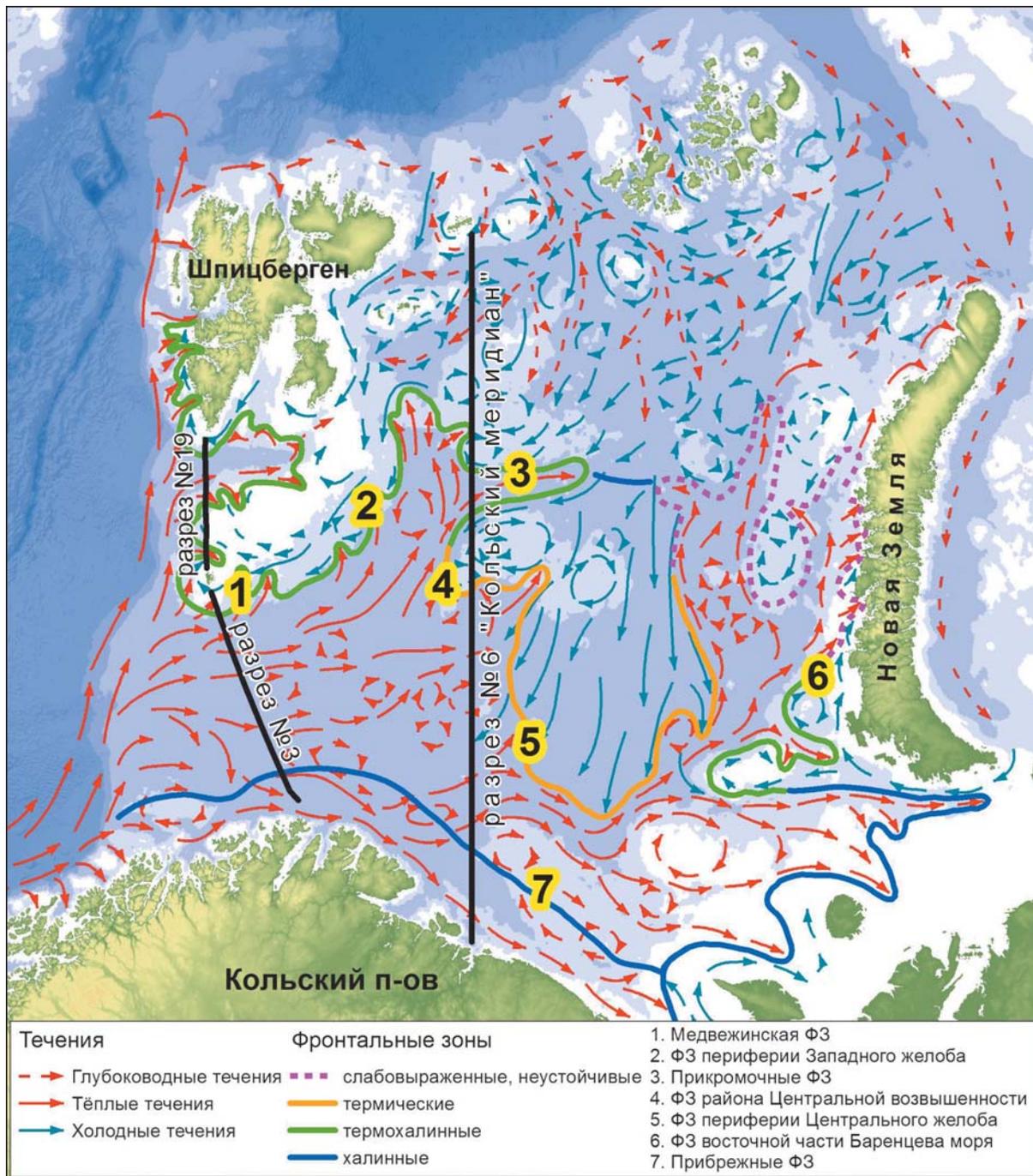


Рис. 1. Схема циркуляции вод в Баренцевом море [4], положение климатических фронтальных зон и стандартных разрезов № 3, 6 и 19

Fig. 1. Scheme of water circulation in the Barents sea [4], position of climatic frontal zones and standard sections no. 3, 6, and 19

- ФЗ периферии Центрального желоба (зона взаимодействия баренцевоморских вод с атлантическими и прибрежными);
- ФЗ восточной части Баренцева моря (зона взаимодействия вод Мурманского и Новоземельского течений с водами шельфа архипелага Новая Земля);
- прибрежные ФЗ (зоны взаимодействия баренцевоморских вод, вод Мурманского течения и вод речного стока).

Исследование характеристик фронтальных зон в общем случае выполняется по данным дистанционного зондирования Земли и *in situ* с борта научно-исследовательского судна. С помощью спутникового зондирования в инфракрасном и оптическом диапазонах определяется положение ФЗ на поверхности моря и ее ширина. Существенным ограничением при этом является наличие облачности, характерное как для арктического региона в целом, так и для ак-

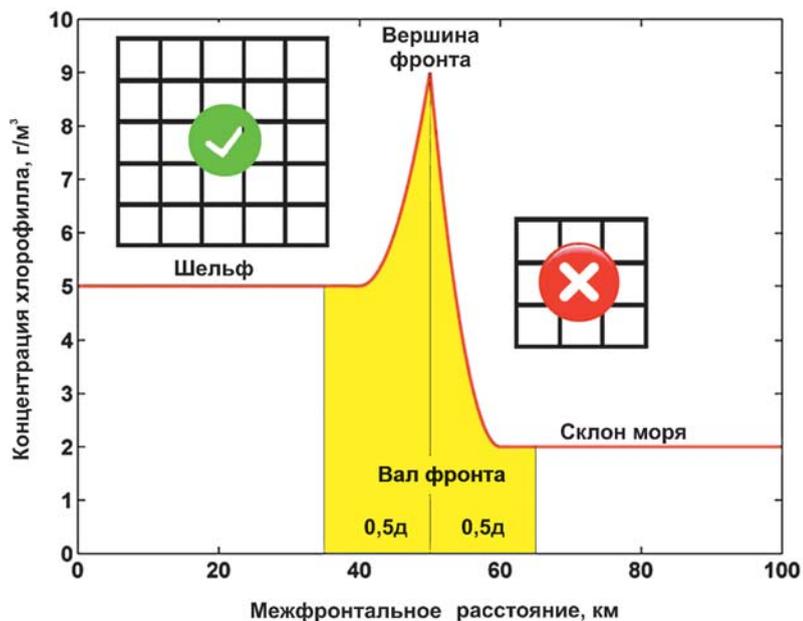


Рис. 2. Модель «пика» в распределении хлорофилла [11]
 Fig. 2. Model "peak" in the distribution of chlorophyll [11]

ватории Баренцева моря в частности. Слабое развитие сети дрейфтеров, невозможность построения обширной сети подвижных датчиков, установленных на морских млекопитающих, отсутствие проектов по применению глайдеров в западном секторе российской Арктики из-за природных условий, технических проблем и санкционного режима делают судовые экспедиции единственным надежным инструментом регулярных по времени и пространству съемок, учитывающих вертикальную структуру водных масс.

Экспедиционные исследования в Баренцевом море выполняются регулярно уже более 100 лет. Особую роль играют станции стандартных океанографических разрезов. Наиболее обеспечены данными (с учетом экспедиций последних лет) разрезы № 6 («Кольский меридиан»), 3 (мыс Нордкап — остров Медвежий), 19 (остров Медвежий — мыс Зюйдкап, остров Западный Шпицберген). Сочетание гридированных данных, построенных в результате спутниковых исследований, а также контактных измерений, позволит уточнить положение ФЗ для конкретных периодов и акваторий, а также сделать выводы об их динамике относительно среднегодичных показателей. Большинство российских экспедиций на рассматриваемой акватории выполняются Мурманским морским биологическим институтом Кольского научного центра РАН (ММБИ КНЦ РАН) и Полярным научно-исследовательским институтом морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича (ПИНРО). В данной работе учитывались контактные данные как ММБИ КНЦ РАН, так и полученные в рамках обмена данные ПИНРО.

Цель работы — проанализировать положение и характеристики фронтальных зон Баренцева моря

с 2008 по 2018 гг. по данным температуры поверхности моря (ТПМ), полученным в результате спутникового зондирования и *in situ* (на стандартных разрезах).

Материалы и методы

Современный подход к автоматической идентификации фронтов по растровому изображению, полученному в результате гридирования спутниковых данных, содержит следующие этапы [1; 5; 10—21], каждый из которых предполагает последовательности оконных преобразований: (1) сглаживание (фильтрация), (2) определение наличия фронта, (3) поиск пикселей фронта, (4) проверка на обнаружение ложного фронта (или двойного фронта).

Традиционными являются следующие варианты сглаживания: скользящее среднее, медианный фильтр, фильтр Гаусса. Применяются комбинированные варианты, а также контекстуальные — с условиями настройки фильтра и/или необходимости его применения для каждого пикселя в зависимости от свойств пикселей окна [11].

Понятия «пиков» (трехточечных экстремумов) и «хребтов» (пятиточечных экстремумов) используются в [11]: после двух проходов окнами размером 5×5 пикселей (для обнаружения хребтов) и 3×3 пикселя (для обнаружения пиков) медианный фильтр с ядром 3×3 пикселя применяется к пикам, а пиксели хребтов не преобразуются (рис. 2).

Критерии эффективности сглаживания можно разделить на статистические и экспертные. Хорошо формализуются и просчитываются в автоматическом режиме следующие статистические показатели: (1) количество пикселей, отнесенных к какому-либо фронту, (2) средняя суммарная длина протяженных фронтов (каждый не менее, например, 10 пикселей [19]). Эталонные значения для этих показателей получались на основе экспертной оценки, учитывающей геометрию фронтов, долю коротких фронтов, наличие двойных фронтов, близость к берегу (береговой линии).

Основой для построения нового скалярного поля — поля модулей горизонтальных градиентов (далее не будем делать акцент на слове «горизонтальный») — выступает процедура численного дифференцирования в двумерной области.

Представим стандартный набор расчетных формул, следуя [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{(i,j+1)} - T_{(i,j-1)}}{2Sx}, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_{(i+1,j)} - T_{(i-1,j)}}{2Sy},$$

где T — значение температуры в узле регулярной сетки, °C; Sx — шаг расчетной сетки по параллели, км; Sy — шаг расчетной сетки по меридиану, км.

Из-за сходимости меридианов к полюсу Sx не является постоянной величиной и вычисляется по формуле

$$Sx = 1,852 \left| \lambda_{(i,j+1)} - \lambda_{(i,j)} \right| \cos \left(\frac{\varphi_{(i+1,j)} + \varphi_{(i-1,j)}}{2} \right),$$

$$Sy = 1,852 \left| \varphi_{(i+1,j)} - \varphi_{(i,j)} \right|,$$

где λ и φ — широта и долгота узлов расчетной сетки, рад.

Модули разностей значений широты и долготы между узлами сетки вычислялись в десятичных минутах.

Итоговый модуль градиента температуры рассчитывается по формуле

$$|\text{grad}T| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2}.$$

Рассмотренный способ имеет явную привязку к географическим координатам, что определяет его как популярный и естественный выбор при обработке геоданных. В частности, авторы использовали этот метод в работах [24; 25] при исследовании полей температуры в Азовском море и солёности в Баренцевом море соответственно. Однако не менее распространены и методы работы с растровым изображением для океанографического поля. В таком случае достаточно понятия «соседства» пикселей без установления в расчетах связи между пространственными точками и точками растра и расстояния между точкам. Примером является оператор Собеля [11; 13; 17; 22] — дискретный дифференциальный оператор, вычисляющий приближенное значение градиента яркости изображения. Результатом применения оператора в каждой точке изображения является либо вектор градиента яркости в этой точке, либо его норма. Оператор Собеля основан на свертке изображения небольшими целочисленными фильтрами в вертикальном и горизонтальном направлениях. Ядра преобразования имеют вид

$$G_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad G_y = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}.$$

Поле модулей градиентов для температурного растра A определяется по формуле

$$|\text{grad}T| = \sqrt{(G_x * A)^2 + (G_y * A)^2},$$

где «*» — оператор тензорной свертки.

Оператор Собеля эффективен в предположении отсутствия высокочастотных колебаний и достаточного пространственного разрешения, при котором просматривается инерционность процессов. Варианты размера и коэффициентов ядра для дифференцирования в двумерной области также можно найти в [22]. Многоступенчатый метод определения границ на растре, использующий сглаживание, дифференцирование и проверки для идентификации границ на произвольном растровом изображении, — метод Кэнни [23] — также применяется для решения океанографических задач [14].

Градиентные методы позволяют обнаруживать фронты различной силы (т. е. средней относительной величины модуля градиента в точках фронта), недостаток этих методов — невозможность распознавания и игнорирования (удаления) ложных фронтов, вызванных выбросами в измерениях.

При идентификации фронтов также привлекаются статистические данные, позволяющие сделать вывод о наличии фронта или его фрагмента в окне поиска. Исследование гистограммы частот значений самой океанографической характеристики или модуля градиента позволяет определять слабо выраженные фронты на фоне сильного шума: сначала для окна определяется, есть ли хотя бы один фронт, а потом выполняется реконструкция точек всего фронта. Классическим является метод SIED (Single Image Edge Detector) [12; 14; 16; 18; 19]. Для обнаружения ложных фронтов применяется модификация, основанная на последовательном введении нескольких окон при работе с одними и теми же пикселями (CMW, Combination Multiple Windows). SIED действует на трех логических уровнях работы с растром: изображения (исключит из анализа области, покрытые облаками), окна поиска (сначала изображение разделяется на перекрывающиеся окна размером 32×32 пикселя, затем для каждого окна строится гистограмма частот; если гистограмма оказывается бимодальной, а также каким-то образом подтверждается подходящая геометрия контуров, то отдельные пиксели изображения можно объявить пикселями фронта), локальном (алгоритм соединяет точки фронта, чтобы сформировать непрерывный контур фронта).

Таким образом, для фронта могут быть определены: (1) порог (наименьшее значение модуля градиента, при котором пиксел считается пикселем фронта), (2) сила, (3) длина (количество пикселей фронта, каждый из которых соседствует хотя бы с одним пикселем этого фронта), (4) частота обнаружения (вероятность того, что пиксел фронта характеризуется достаточными значениями модуля градиента в определенный момент времени).

И параметры методов на каждом этапе идентификации, и характеристики самих фронтов требуют выполнения вычислительных экспериментов для оптимизации числовых значений, учитывающих пространственное разрешение сетки данных (связь рас-

тра и геограда), тип гидрологического режима конкретной акватории и метеорологического режима над ней, время года.

Остановимся лишь на тех работах, которые исследуют восстановленные в узлах регулярной сетки поля данных Aqua MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) с пространственным разрешением 1—4 км.

В [19] сделан обзор имеющихся этапов и методов идентификации фронтов, представленных в литературе за 1992—2015 гг. Проведены вычислительные эксперименты для 39 наборов значений параметров на этапе сглаживания. Варьировались тип фильтров (скользящее среднее, медианный, Гаусса); размеры окна поиска в пикселах (16×16, 24×24, 32×32), для отдельных пикселей которого принимается решение о необходимости сглаживания; ядра сглаживания (окна 3×3, 5×5, 7×7, 9×9 пикселей). Исследование выполнено для акваторий: Мозамбикский пролив (область Северного экваториального Мадагаскарского течения), атлантическое побережье Марокко, области моря, омывающие север Австралии. Использовались ежедневные карты 2003—2012 гг. Валидация данных по контактному измерению не проводилась. Наиболее эффективной оказалась такая конфигурация: медианный фильтр, ядро размером 5×5 пикселей для сильных фронтов (проявляются часто, относительно легко идентифицируются по ежесуточным данным не менее чем в 5% годового периода измерений) и 7×7 пикселей для слабых фронтов, окно поиска 16×16 пикселей. Метод поиска — SIED. Пороговое значение для идентификации фронта (на основе статистических и экспертных оценок) — 0,02 °C/км, меньшие значения относят к шумам безотносительно к пространственной структуре поля градиентов. Среднее значение, полученное в [19], составило 0,042 °C/км. Показано, что смена разрешения от 1 до 4 км не влияет качественно на картину фронтов для исследованных областей и временных промежутков.

В [14], где обсуждаются результаты для Северного моря (разрешение 1 км, AVHRR, расчетная сетка 1100×1000 точек, 2008—2011 гг.), применен комбинированный метод поиска пикселей фронта (метод Кэнни, затем модифицированный SIED, окно поиска 32×32) со сглаживанием фильтром Гаусса. Данные с аналогичным разрешением (продукт GHRSSST MUR, Group for High Resolution Sea Surface Temperature Multi-scale Ultra-high Resolution) применяются в [16] для акватории у берегов Чили за 2003—2016 гг. Сглаживание — простое скользящее среднее в окне 30×30, метод идентификации — SIED, окно поиска 32×32 точки (при таком подходе одной точке расчетной сетки соответствует визуализация одним пикселем). В обеих работах делается попытка реконструкции не только фронтов, но и фронтальных зон, также в обеих работах утверждается отсутствие трендов

во временной изменчивости положения восстановленных фронтов.

Исследование силы и частоты фронтов делается в [13] для Азовского, Черного и Мраморного морей (данные 2008—2013 гг., разрешение 1 км, Aqua MODIS). Сглаживание и дифференцирование проводится с помощью медианного фильтра и оператора Собеля соответственно по методике [11]. Выполнено попиксельное суммирование длин модулей градиентов, нормированное на количество изображений, содержащих значения в соответствующей точке, для классификации акваторий. Проанализированы временные ряды полученных ежесуточных значений, осредненных по классам.

Усложнение преобразования Собеля присутствует в работе [17]: оно представляется в виде линейной комбинации операторов, а итоговое значение модуля градиента определяется через введение пороговых значений.

Более сложная схема оценки силы и частоты фронтов делается в [18]. Анализируются ежемесячные вариации фронтов в заливе Бохайвань, Желтом, Восточно-Китайском морях. Структура включает 11 фронтов, данные при разрешении 4 км, с 2000 по 2013 гг., используются контекстный фильтр [11] и метод SIED. Поле модулей градиентов определяется с помощью преобразования Собеля. В работе вводится улучшенный градиент — скалярное поле значений, вычисленных как сумма парных произведений частоты пиксела фронта / вне фронта и среднего градиента пиксела фронта / вне фронта.

Имеется достаточно работ, в которых показана связь изменчивости поля модулей градиентов и распределения гидробионтов, в частности в Северной Атлантике и северной части Тихого океана для рыб [1; 15; 20]. Однако стоит отметить, что барьерный эффект фронтов и количественная оценка влияния при миграции рыб недостаточно исследованы, экспедиционные данные говорят о проникновении нетипичных представителей в акватории и конкурентных взаимодействиях видов с разными физиологическими режимами существования. Мало исследован этот вопрос и для Баренцева моря.

В настоящей работе данные о температуре поверхности Баренцева моря были получены с веб-ресурса Giovanni, который облегчает доступ к информации со спектрометра MODIS, установленного на космический аппарат Aqua. MODIS имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и дальнем ИК диапазонах. Пространственное разрешение анализируемых данных (форматы файлов netCDF и GeoTIFF) — 4 км, временное осреднение — 8 сут. Конвертация файлов netCDF выполнялась с помощью Raport v4.9.5, расчеты модуля градиента на поверхности по спутниковым данным — MATLAB R2015b.

Совместное использование данных дистанционного зондирования Земли по температуре и соле-

ности в настоящей работе затруднительно, так как современные технологии не позволяют определять соленость поверхностных вод с достаточной точностью [26].

В работе также используются данные СТД-зондирований, полученные в ходе экспедиций ММБИ и ПИНРО. Для измерения океанографических параметров использовались СТД-зонды, измеряющие электропроводность, температуру и давление. Зондирования водной толщи производились от поверхности до дна. Данные обрабатывались с помощью программного обеспечения от производителей зондов.

Расчеты для данных *in situ* также проводились в среде MATLAB R2015b: вычислялись модули градиентов для пар ближайших точек измерений на горизонтах. Построение контуров фронтов с помощью сглаживания и дифференцирования по методике [11] для раstra температурных полей поверхности моря (спутниковых данных) выполнялось на языке R в среде RStudio v1.1 (с привлечение пакета gres). Для наглядного представления результатов расчета градиентов по данным *in situ* строились разрезы в программе Surfer v13. Визуализация полей модулей градиентов (горизонтальных) и контуров на карте выполнялась в программном средстве ArcGIS v10.4.1. В качестве критерия наличия фронта использовалось критическое значение градиентов температуры и солености, в пять раз превышающее климатические градиенты для Баренцева моря (0,01 °C/км и 0,001 ‰/км) [1; 6].

Результаты

В данной работе анализируются данные СТД-зондирования за последнее десятилетие (табл. 1). Для расширения возможности расчета и определения положения фронтальных зон Баренцева моря рассматриваются возможные методы обработки спутниковой информации для исследуемого района и временных периодов. Основной характеристикой для анализа стала температура поверхности моря.

Были рассмотрены два приведенных в предыдущем разделе метода обработки спутниковых данных о распределении температуры на поверхности моря: расчет модуля градиента температуры в узлах сетки непосредственно по значениям (с последующим визуальным анализом для идентификации фронтов) [1] и автоматическое выделение контуров (высокоградиентных зон) на растровом изображении [11].

Наблюдавшаяся в рассматриваемые периоды облачность не позволила охватить данными всю исследуемую акваторию. Выделение фронтальных зон контурным методом становится трудно реализуемым вследствие фрагментарного представления высокоградиентных зон. В таких случаях более информативным становится метод расчета модуля горизонтального градиента характеристики, так как в отличие от контурного метода он имеет полную шкалу значений взамен лишь нескольких (в данной

Таблица 1. Данные СТД-зондирования

Год	Период контактных измерений	Период осреднения спутниковых снимков ТПМ
2008	16—20.08	12—28.08
2009	12—17.08	05—21.08
2010	19—22.08	13—29.08
2011	23—26.09	22—30.09
2012	09—11.08	04—20.08
	08—15.11	07—15.11
2013	09—11.08	05—13.08
	10—13.11	08—16.11
2014	12—15.08	05—21.08
2015	06—12.12	02—18.12
2016	06—11.04	29.03—14.04
2017	13—17.07	12—20.07
	30.11—07.12	24.11—10.12
2018	14—16.05	09—17.05

работе трех, но можно обойтись и двумя — фронт / не фронт) градаций другого. Последующий визуальный анализ карты затрудняет применение метода для большого количества отдельных растров (полей) температуры.

На рис. 3 приведены результаты применения данных методов в наиболее удачный период, когда данные ТПМ покрывали большую часть рассматриваемой акватории. Как следует из рисунка, оба метода дают похожую конфигурацию фронтов, но изображение слева (см. рис. 3а) содержит отдельные точки и короткие отрезки («геометрический шум»), которые следует интерпретировать как фрагменты фронтов основных фронтальных зон или как мелко-масштабные неоднородности, вызванные субмезомасштабными или мезомасштабными процессами. При автоматизированном выделении контуров необходимы дополнительные исследования метода, чтобы понять, соответствует геометрический шум вихревым структурам (см. рис. 3а) или является набором артефактов в виде ошибок метода.

Наибольший массив данных по гидрологическому разрезу, пересекающему фронтальные зоны Баренцева моря, имеется на стандартном вековом разрезе «Кольский меридиан». Разрез «Кольский меридиан» в классическом его виде (от 69°30' до 74° с. ш. по 33°30' меридиану) пересекает три потока атлантических вод: Южную (прибрежную), Центральную и Северную ветви Нордкапского течения. Продленный вариант данного разреза (до 78°44' с. ш.) захва-

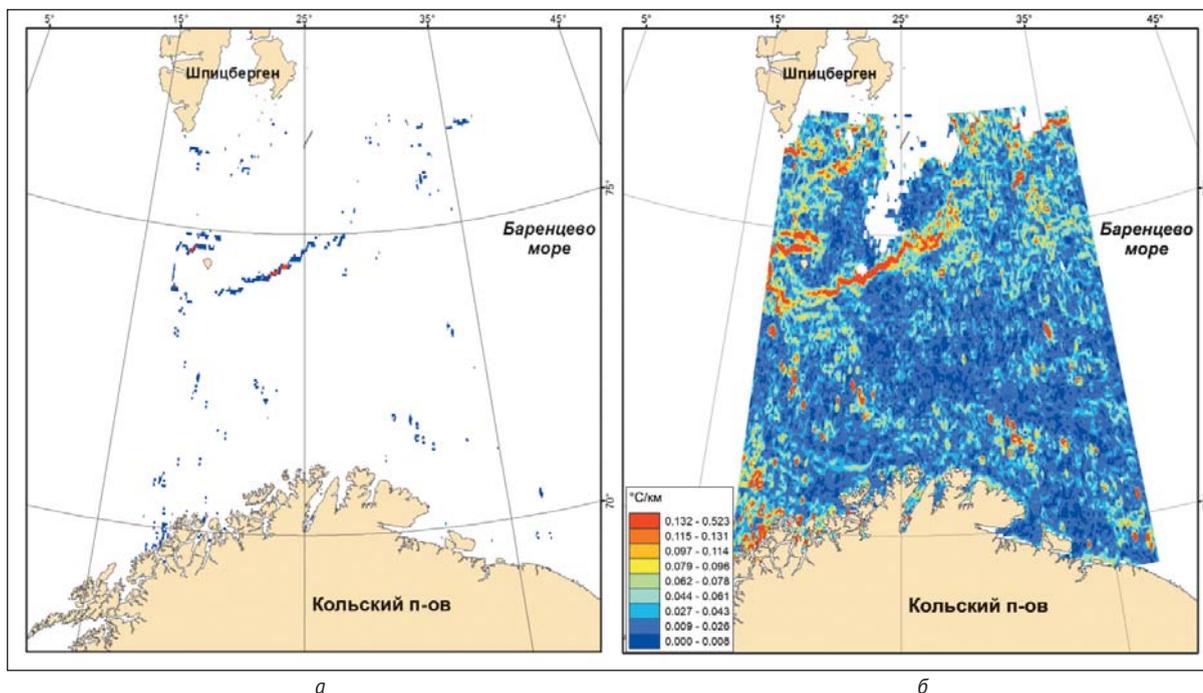


Рис. 3. Сравнение методов выделения высокоградиентных зон Баренцева моря 2–18 декабря 2015 г.: метод автоматического выделения контуров фронтов (а), метод расчета модуля градиента температуры (б)

Fig. 3. Comparison of methods for the isolation of high-gradient zones of the Barents sea 2–18 December 2015: a method for automatically detecting contours of the fronts (a), method of calculating the temperature gradient module (b)

тывает также область распространения холодных и распресненных арктических вод. В летний период арктическая водная масса занимает промежуточный слой (на глубинах от 20 до 100 м) с отрицательными значениями температуры над возвышенностью Персея. Воздействие солнечной радиации в это время формирует верхний прогретый до горизонта 20-метровый слой, остающийся распресненным до примерно 10 м. Вследствие этого верхний слой имеет пониженную плотность. Это обуславливает существование арктической фронтальной зоны между баренцевоморскими водами с температурой по южную границу фронта 2–4°C и соленостью 35‰ и арктическими водами с температурой от –1 до –1,8°C и соленостью 34,2–34,4‰. Для данной фронтальной зоны температура и соленость хорошо согласованы (положительно коррелированы). Ширина области больших контрастов температуры на разрезе за рассматриваемое десятилетие составляет около 80 км, по глубине распространяется от 25 до 120 м, максимальные градиенты температуры и солености составляют 0,08 °C/км и 0,02 ‰/км соответственно. Халинная фронтальная зона по положению практически совпадает с термической, распространяясь при этом от поверхности до горизонта 100 м и имея ширину на разрезе около 100 км.

В осенне-зимний период 2008–2018 гг. та же фронтальная зона в поле температуры распространяется от поверхности до 200 м, имеет длину приблизительно 110 км, изменение температуры составляет в среднем 2,63°C, солености — 0,72‰.

Примером может служить ситуация для ноябрьской экспедиции 2017 г. (рис. 4).

Над желобом Персея арктическая фронтальная зона отклоняется к югу, к Центральной банке в своей глубинной части. Халинная фронтальная зона расположена к северу от термической, по глубине простирается от поверхности примерно до 70 м, имеет ширину на разрезе около 140 км. Распределение плотности также указывает на наличие градиентов температуры и солености в данной области.

На южном склоне Центральной возвышенности в осенне-зимний период присутствует глубинная фронтальная зона, выраженная в поле температуры. Расположена она на глубинах от 100 до 200 м, длина вдоль разреза составляет примерно 50 км, максимальный горизонтальный градиент температуры — 0,11 °C/км. Формируется эта фронтальная зона за счет взаимодействия холодного купола глубинных вод с окружающими водами. В летний период наблюдается похожая картина, однако контраст температуры недостаточно обострен для выделения фронтальной зоны.

В поле солености на разрезе «Кольский меридиан» наблюдается прибрежная фронтальная зона, образующаяся за счет взаимодействия вод Мурманского прибрежного течения с распресненными водами материкового стока. В литературе отмечается, что в поле температуры эта фронтальная зона выражена незначительно [6]. Значит, анализ связи изменчивости полей температуры и солености здесь не будет статистически значимым. Распределение

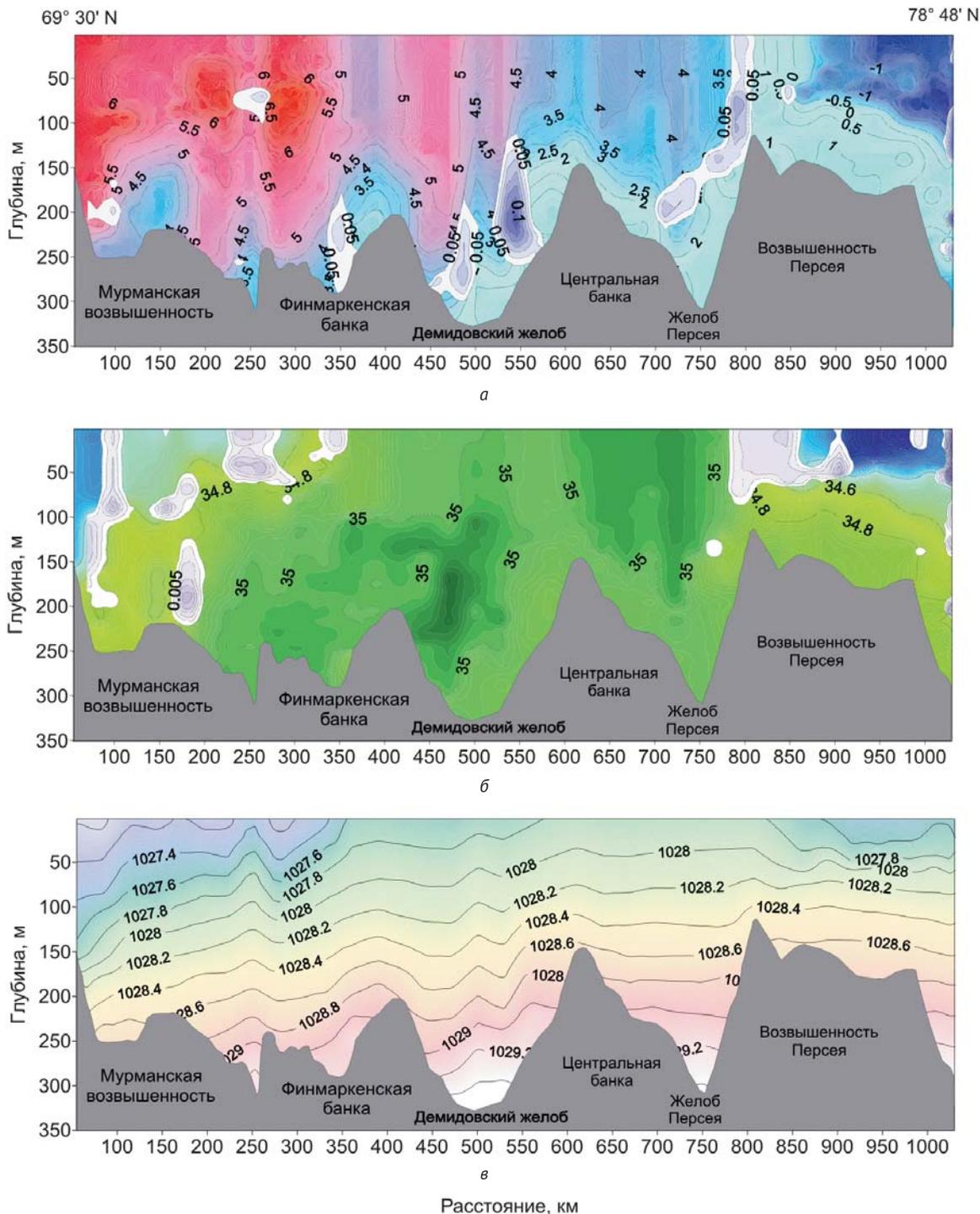


Рис. 4. Распределение температуры, °С (а), солёности, епс (б) и плотности, кг/м³ (в) на вертикальном разрезе «Кольский меридиан» в ноябре 2017 г.

Fig. 4. Distribution of temperature, °C (a), salinity, EPS (б) and density, kg/m³ (в) on the vertical section of the Kola Meridian in November 2017

плотности на данном участке показывает наличие градиентной зоны, в которой изопикны сгущаются (т. е. градиенты растут) в направлении от берега до границы распространения распресненных вод. Для оценки изменчивости температуры и солёности за период с 2008 по 2018 гг. рассмотрим два наибо-

лее высокоградиентных участка, наблюдавшихся на разрезе «Кольский меридиан». Это арктическая фронтальная зона, приуроченная к южному склону возвышенности Персея, и прибрежная ФЗ в южной части разреза. На рис. 5 показана временная динамика значений градиента солёности на поверхности

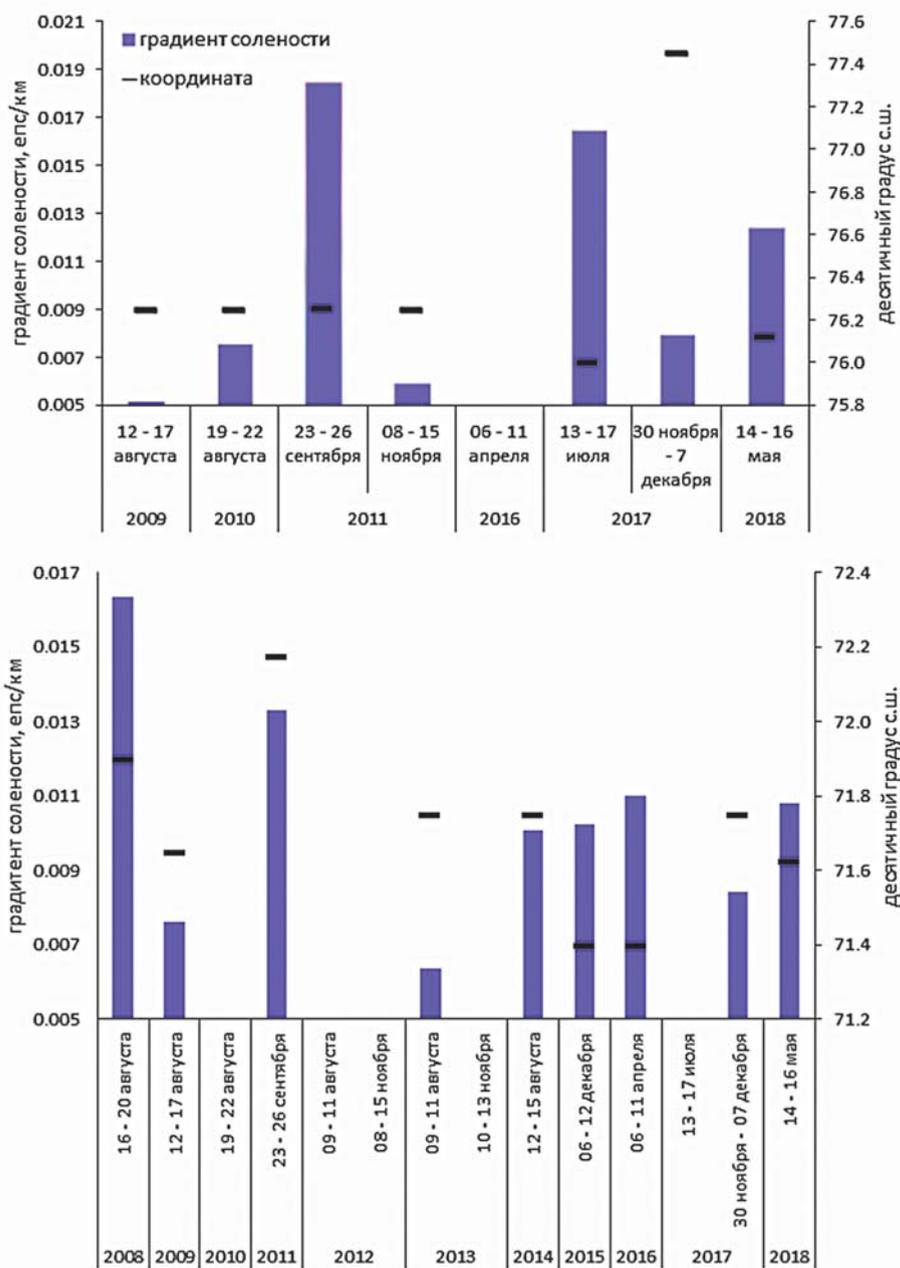


Рис. 5. Изменчивость величины градиента солености и положения арктической (вверху) и прибрежной (внизу) фронтальных зон
 Fig. 5. Variability of salinity gradient and position of Arctic (top) and coastal (bottom) frontal zones

моря в области арктической и прибрежной ФЗ (по контактному данным).

Рассматриваются только халинные ФЗ по двум причинам: прибрежная ФЗ не выделяется в поле температуры, а арктическая термическая ФЗ заглублена. Горизонтальными штрихами на рис. 5 отмечается широта, к которой приурочено положение данной фронтальной зоны. По первым четырем значениям можно видеть, что с августа по ноябрь (в разные годы) фронтальная зона сохраняла свое географическое положение, хоть и величина градиента существенно изменялась. В апреле градиент не

превышал граничного значения в 0,05 °C/км. Далее в июле 2017 г. ФЗ, вероятно, сместилась в южном направлении более чем на градус, а весной 2018 г. практически вернулась к исходному положению. Прибрежная ФЗ также более ярко выражена в поле солености. В летний период здесь наблюдается верхний прогретый слой до 20—50 м (рис. 6).

Горизонтальный градиент температуры в поверхностном слое имеет малые значения. В рассматриваемом районе термическая фронтальная зона находится под прогретым слоем. То есть в летний

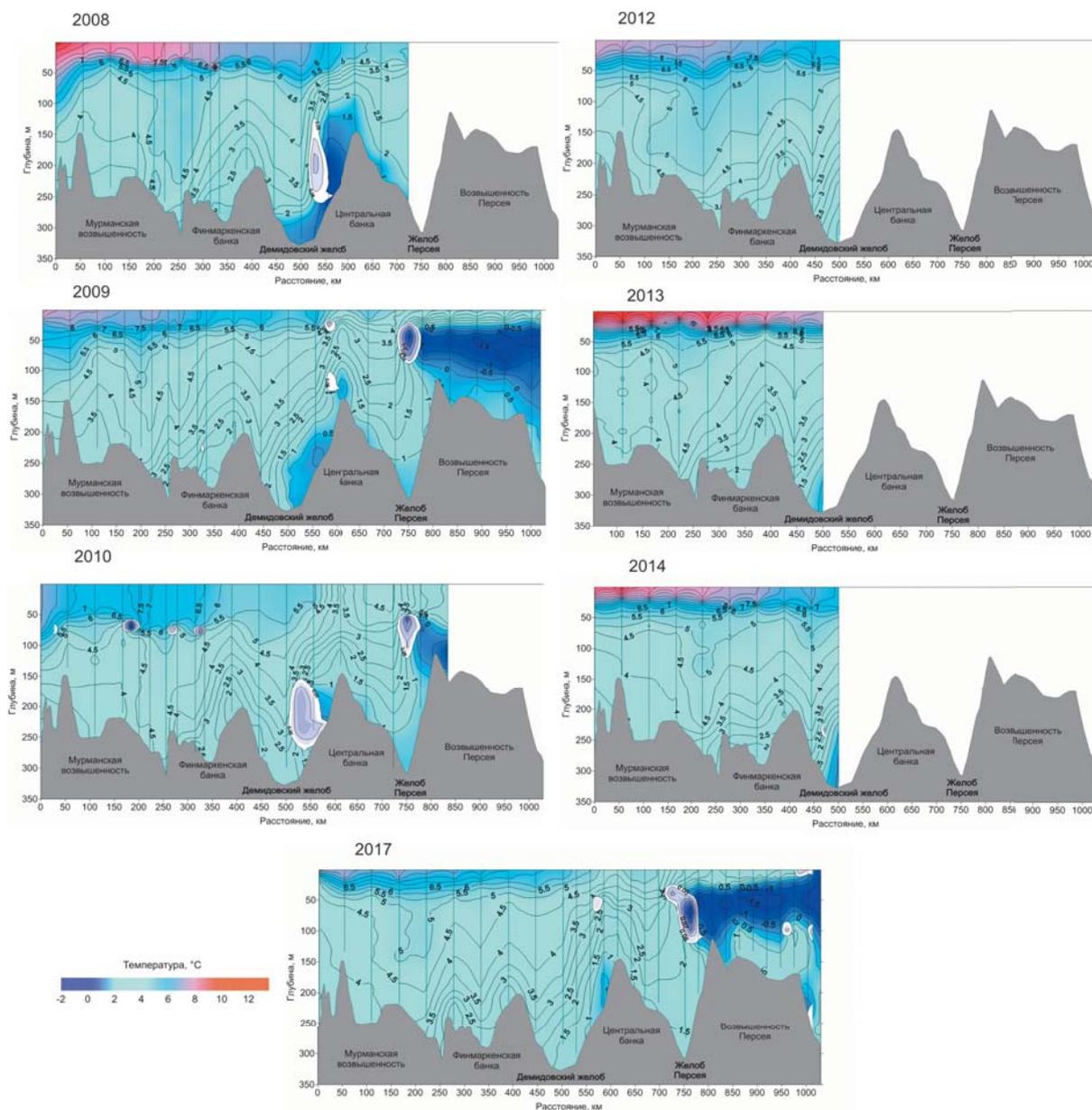


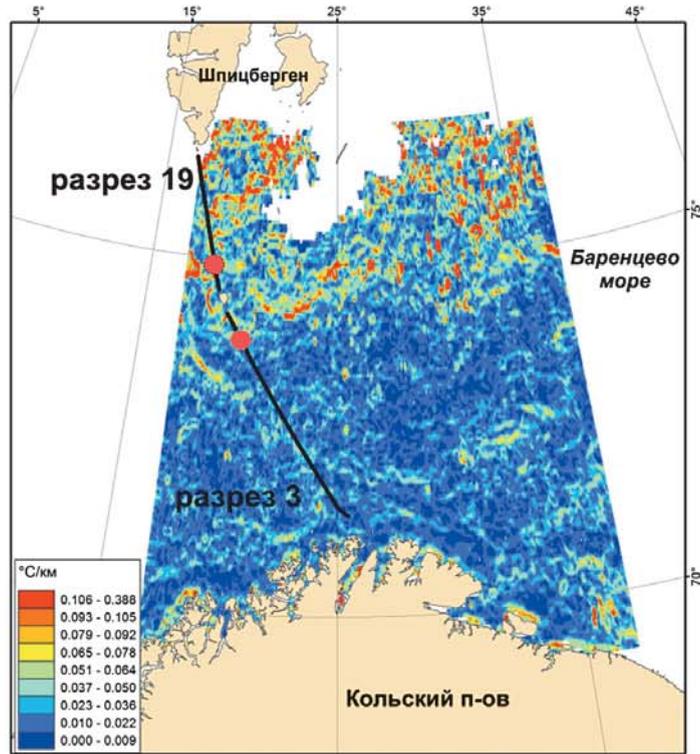
Рис. 6. Распределение температуры воды на вертикальном разрезе «Кольский меридиан» в период летних экспедиций
 Fig. 6. Distribution of water temperature on the vertical section of the Kola Meridian during summer expeditions

период данную ФЗ по ТПМ не имеет смысла рассматривать одновременно с контактными измерениями, так как экспедиционные исследования производятся здесь в основном в летний период. В связи с отсутствием возможностей дистанционного мониторинга солености оказалось, что использование данных спутникового зондирования совместно с контактными данными на разрезе «Кольский меридиан» в рассматриваемые периоды экспедиционных исследований не дало достаточно репрезентативных результатов.

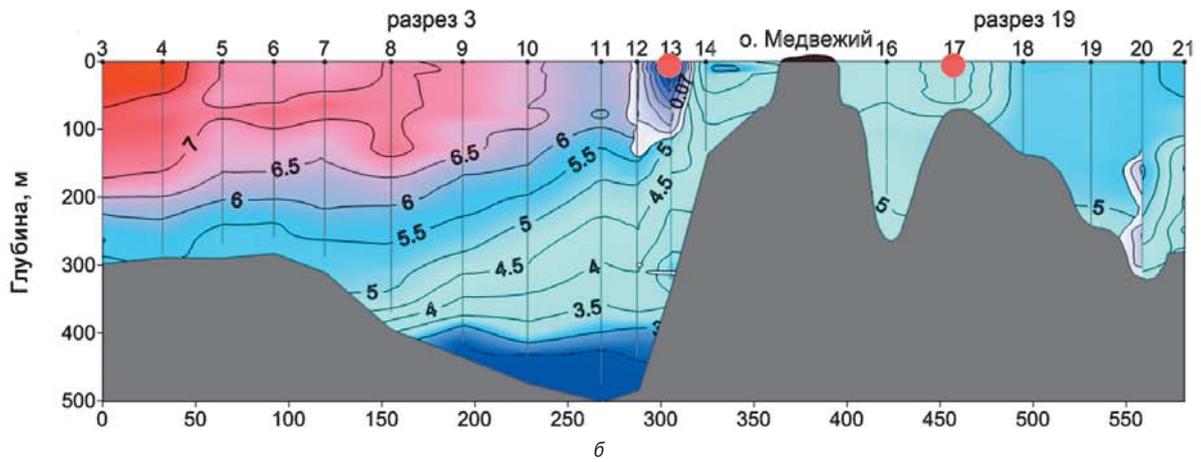
Рассмотрим медвежинскую фронтальную зону (рис. 7). Здесь проходят разрезы 3 и 19. Они выпол-

нялись ММБИ намного реже разреза 6 («Кольского меридиана») — дважды за последние 10 лет.

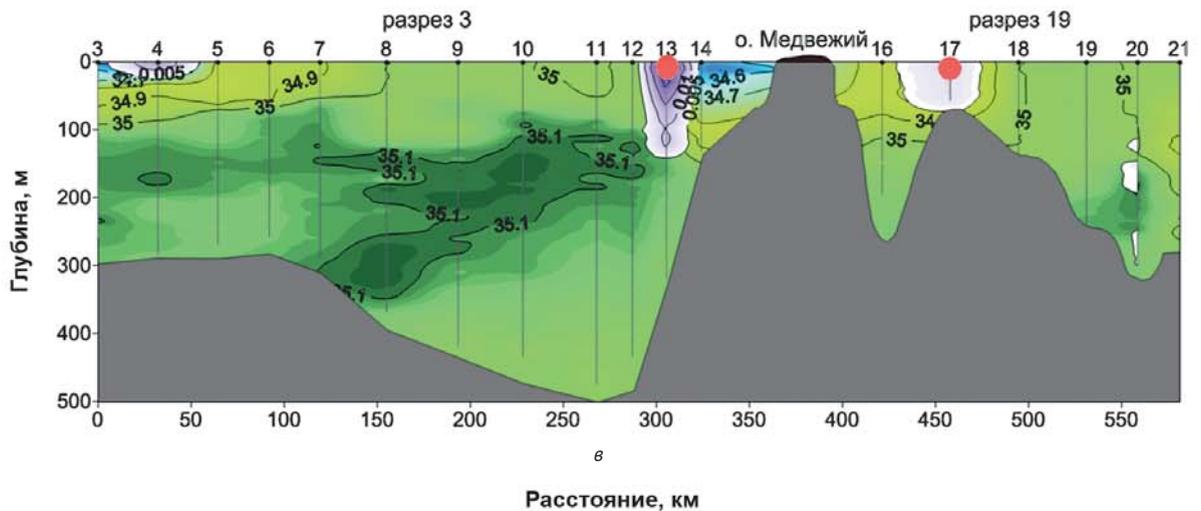
Наиболее высокие градиенты характерны для Медвежинско-Шпицбергенского района. Высокие температурные контрасты формируются за счет того, что в этой части моря теплые и соленые атлантические воды вступают в контакт с холодными и распресненными арктическими водами. Продвигаясь в восточном и северо-восточном направлениях, атлантические воды значительно трансформируются, что выражается в понижении их температуры и солености. При этом горизонтальные градиенты в зонах взаимодействия атлантических вод с баренцевоморскими



а



б



в

и местными прибрежными водными массами в центральной и восточной частях моря существенно уменьшаются [6]. Эта фронтальная зона имеет довольно малую ширину (до 50 км) и высокие значения градиентов как температуры, так и солёности. В зимний период в слое 0—100 м здесь происходит взаимодействие приходящих с северо-востока вод арктического происхождения и поступающих с запада вод атлантического происхождения. Поверхностные воды Нордкапского течения в ноябре 2017 г. имели температуру 6—7°C, арктические — не более 3,5°C. Фронтальная зона шириной примерно 40 км занимала слой от поверхности до горизонта 140 м при глубине 350 м. Таким образом, положение медвежинской фронтальной зоны хорошо идентифицируется и по спутниковым (рис. 7а), и по контактными данным как в поле температуры (рис. 7б), так и в поле солёности (рис. 7в).

На рис. 8 приведена динамика положения медвежинской ФЗ за исследуемый период. Для некоторых периодов отмечены также фрагменты прибрежной ФЗ, если ее удалось идентифицировать. В общем плане положение медвежинской ФЗ остается квазистационарным, не претерпевая особенно больших изменений. Однако же использование информации о пространственных сдвигах в различные временные периоды поможет избежать ошибок при планировании экспедиционных полигонных съемок.

Заклучение

В ходе исследования были получены массивы данных в те периоды и для тех районов Ба-

Рис. 7. Распределение модуля градиента температуры воды на поверхности Баренцева моря, °C (а), температуры, °C (б) и солёности, епс (в) на вертикальных разрезах № 3 и 19 (с метками прохождения фронтов на поверхности)

Fig. 7. Distribution of the water temperature gradient module on the Barents sea surface, °C (a), temperature, °C (b) and salinity, EPS (v) on vertical sections no. 3 and 19 (with marks of the fronts on the surface)

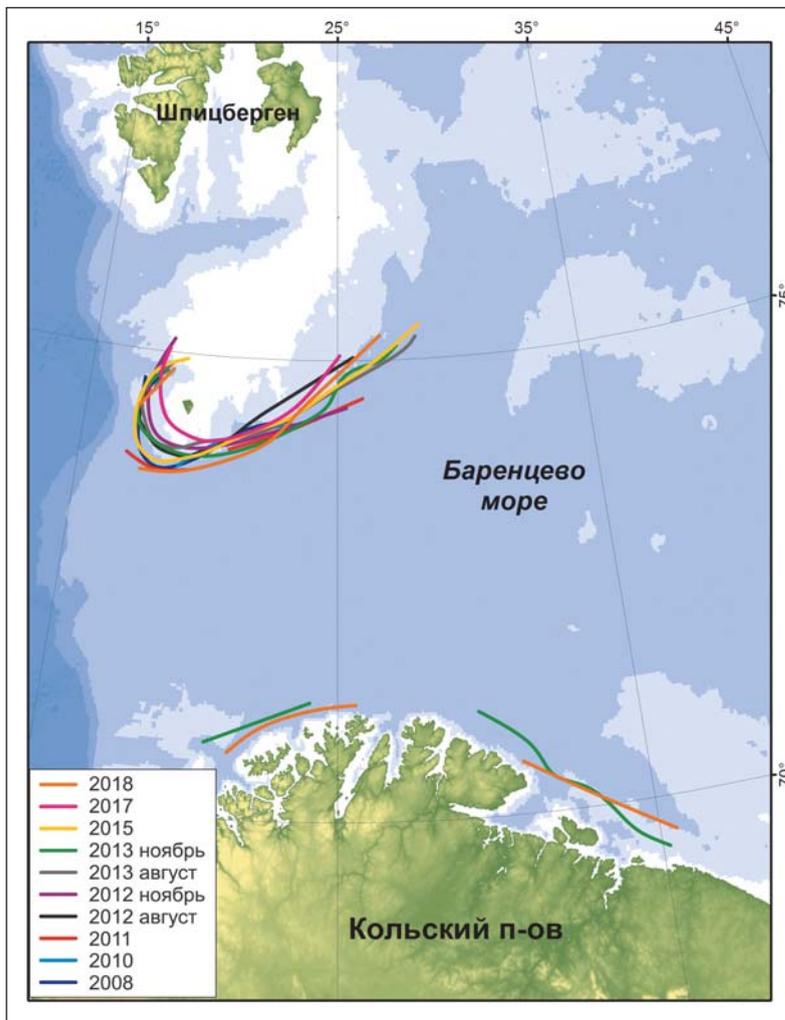


Рис. 8. Динамика положения медвежинской фронтальной зоны по распределению горизонтального градиента температуры на поверхности моря
Fig. 8. Dynamics of the position of the medvezhinskaya frontal zone on the distribution of the horizontal temperature gradient on the sea surface

ренцева моря, для которых имеются репрезентативные данные контактного и спутникового мониторинга с 2008 по 2018 гг. Построены карты и составлены таблицы значений характеристик термических и халинных фронтальных зон для исследованных разрезов. Построены поля модулей горизонтальных градиентов ТПМ и фронты для ТПМ с помощью метода выделения контуров на растре по спутниковым данным.

Представлен анализ положения и характеристик фронтальных зон Баренцева моря с 2008 по 2018 гг. по данным температуры поверхности моря (ТПМ) и *in situ*. Выполнены численные эксперименты для оценки информативности результатов применения двух методов идентификации фронтов. С учетом пространственного разрешения и значительного временного осреднения спутниковых данных метод выделения контуров оказался менее информативным в сравнении с методом построения карт распределения модуля горизонтального градиента характеристики.

Наилучшего результата при выявлении текущего положения фронтальной зоны можно достичь при одновременном использовании данных контактного и спутникового зондирования. При обработке данных

о распределении ТПМ в максимально приближенный к датам измерений промежуток времени возможна корректировка положения гидрологических станций при работах в районе ПФЗ.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы», проекта «Разработка методов экосистемного мониторинга заливов и шельфа Баренцева моря и высокоширотной Арктики, сценарного моделирования аварийных ситуаций при транспортировке нефтепродуктов и радиоактивных отходов и экспериментальных технологий их защиты от загрязнения в условиях морского перигляциала» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61616X0073, соглашение № 14.616.21.0073).

Выражаем признательность анонимному рецензенту за ценные замечания, необходимые для улучшения рукописи.

Литература

1. Ожигин В. К., Ившин В. А., Трофимов А. Г. и др. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / ПИНРО. — Мурманск, 2016. — 260 с.
2. Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. — 2012. — № 2 (6). — С. 66—79.
3. Матишов Г. Г., Волков В. А., Денисов В. В. О структуре циркуляции теплых атлантических вод в северной части Баренцева моря // Докл. РАН. — 1998. — Т. 362, № 4. — С. 553—556.
4. Матишов Г. Г., Дженюк С. Л., Моисеев Д. В., Жичкин А. П. Климатические изменения морских экосистем европейской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2010. — № 3 (86). — С. 7—21.
5. Ожигин В. К. О фронтальных зонах Баренцева моря // Вопросы промысловой океанологии Северного бассейна: Сборник научных трудов. — Мурманск: ПИНРО, 1989. — С. 104—117.
6. Родионов В. Б., Костяной А. Г. Океанические фронты морей Северо-Европейского бассейна. — М.: ГЕОС, 1998. — 293 с.
7. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. — Л.: Гидрометеоздат, 1983. — 296 с.
8. Matishov G. G., Matishov D. G., Moiseev D. V. Inflow of Atlantic-origin waters to the Barents Sea along glacial troughs // Oceanologia. — 2009. — Vol. 51, № 3. — P. 321—340. — DOI: 10.5697/oc.51-3.321.
9. Matishov G. G., Moiseev D. V., Lyubina O. M. et al. Climate and cyclic hydrobiological changes of the Barents Sea from the twentieth to twenty-first centuries // Polar Biology. — 2012. — Vol. 35. — P. 1—18. — DOI: 10.1007/s00300-012-1237-9.
10. Belkin I. M., Cornillon P. C., Sherman K. Fronts in Large Marine Ecosystems // Progress in Oceanogra-

phy. — 2009. — Vol. 81, № 1—4. — P. 223—236. — DOI: 10.1016/j.pcean.2009.04.015.

11. Belkin I. M., O'Reilly J. E. An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery // J. of marine systems. — 2009. — Vol. 78, № 3. — P. 319—326. — DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.11.018.
12. Cayula J.-F., Cornillon P. Edge detection algorithm for SST images // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. — 1992. — № 9 (1). — P. 67—80. — DOI: 10.1175/1520-0426(1992)009<0067:EDAFSI>2.0.CO;2.
13. Karimova S. Hydrological fronts seen in visible and infrared MODIS imagery of the Black Sea // Intern. J. of Remote Sensing. — 2014. — Vol. 35, № 16. — P. 6113—6134. — DOI: 10.1080/01431161.2014.943327.
14. Kirches G., Paperin M., Klein H. et al. GRADHIST — A method for detection and analysis of oceanic fronts from remote sensing data // Remote Sensing of Environment. — 2016. — Vol. 181. — P. 264—280. — DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.009.
15. Mugo R. M., Saitoh S. I., Takahashi F., Nihira A. Evaluating the role of fronts in habitat overlaps between cold and warm water species in the western North Pacific: A proof of concept // Deep-Sea Research Part II. — 2014. — Vol. 107. — P. 29—39. — DOI: 10.1016/j.dsr2.2013.11.005.
16. Oerder V., Bento J. P., Morales C. E. Coastal Upwelling Front Detection off Central Chile (36.5–37°S) and Spatio-Temporal Variability of Frontal Characteristics // Remote sensing. — 2018. — Vol. 10, № 5. — P. 440—464. — DOI: 10.3390/rs10050690.
17. Ping B., Su F., Du Y. Bohai front detection based on multi-scale Sobel algorithm // 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, QC. — Quebec City, 2014. — P. 4423—4426. — DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6947472.
18. Ping B., Su F., Meng Y. et al. Application of a sea surface temperature front composite algorithm in the Bohai, Yellow, and East China Seas // Chinese J. of Oceanology and Limnology. — 2016. — Vol. 34, № 3. — P. 597—607. — DOI: 10.1007/s00343-015-4356-7.
19. Roa-Pascual L., Demarcq H., Nieblas A.-E. Detection of mesoscale thermal fronts from 4 km data using smoothing techniques: Gradient-based fronts classification and basin scale application // Remote Sensing of Environment. — 2015. — Vol. 164. — P. 225—237. — DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.030.
20. Sagarmínaga Y., Arrizabalaga H. Relationship of Northeast Atlantic albacore juveniles with surface thermal and chlorophyll-a fronts // Deep-Sea Research Part II. — 2014. — Vol. 107. — P. 54—63. — DOI: 10.1016/j.dsr2.2013.11.006.
21. Stendero I., Rhein M., Hollmann R. A high resolution salinity time series 1993—2012 in the North Atlantic from Argo and Altimeter data // J. of Geophysical Research: Oceans. — 2016. — Vol. 121, № 4. — P. 2523—2551. — DOI: 10.1002/2015JC011439.
22. Blackledge J. M. Digital image processing. — Chichester: Horwood Publ., 2005. — 824 p.

23. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 1986. — № 8 (6). — P. 679—698. — DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
24. Запорожцев И. Ф., Моисеев Д. В. Верификация региональной конфигурации глобальной гидродинамической модели для Азовского моря по данным in situ // Наука Юга России. — 2018. — № 1 (14). — С. 59—70. — DOI: 10.23885/2500-0640-2018-14-1-59-70.
25. Запорожцев И. Ф., Моисеев Д. В. Оценка временной изменчивости затока атлантических вод в Баренцево море по термохалинным данным разреза «Кольский меридиан»: с 1970 г. до наших дней // Процессы в геосредах. — 2018. — № 3 (17). — С. 223—224.
26. Костяной А. Г. Спутниковый мониторинг климатических параметров океана. — Ч. 2 // Фундамент. и приклад. климатология. — 2017. — Т. 3. — С. 57—64. — DOI: 10.21513/2410-8758-2017-3-57-64.

Информация об авторах

Моисеев Денис Витальевич, кандидат географических наук, заместитель директора по науке, Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН (183010, Россия, Мурманск, Владимирская ул., д. 17), e-mail: denis_moiseev@mmbi.info.

Запорожцев Иван Федорович, кандидат технических наук, доцент кафедры математики, физики и информационных технологий, Мурманский арктический государственный университет; научный сотрудник, Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН (183010, Россия, Мурманск, Владимирская ул., д. 17), e-mail: zaporozhtsev.if@gmail.com.

Максимовская Татьяна Михайловна, стажер-исследователь, Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН (183010, Россия, Мурманск, Владимирская ул., д. 17), e-mail: maximovskaja.t@yandex.ru.

Духно Георгий Никитич, младший научный сотрудник, Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН (183010, Россия, Мурманск, Владимирская ул., д. 17), e-mail: duhno@mmbi.info.

Библиографическое описание статьи

Моисеев Д. В., Запорожцев И. Ф., Максимовская Т. М., Духно Г. Н. Идентификация положения фронтальных зон на поверхности Баренцева моря по данным контактного и дистанционного мониторинга (2008—2018 гг.) // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 2 (34). — С. 48—63. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-48-63.

IDENTIFICATION OF FRONTAL ZONES POSITION ON THE SURFACE OF THE BARENTS SEA ACCORDING TO IN SITU AND REMOTE SENSING DATA (2008—2018)

Moiseev D. V.

Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences (Murmansk, Russian Federation)

Zaporozhtsev I. F.

Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Murmansk Arctic State University (Murmansk, Russian Federation)

Maximovskaya T. M., Dukhno G. N.

Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences (Murmansk, Russian Federation)

The article was received on December 10, 2018

Abstract

In the paper analysis of position and characteristics of frontal zones in the Barents Sea from 2008 to 2018 is presented according to sea surface temperature and salinity data obtained as a result of satellite (temperature only) and in situ (along standard oceanographic sections no. 3, 6, 19) measurement. We perform numerical experiments to evaluate the informativeness of the results of using two front identification methods. The first one builds the fields of the modules of the horizontal gradients of the sea surface temperature, the second one generates contours (fronts). The latter is based on digital image processing method to identify boundaries with

contextual median filtering and Sobel differentiation performing. While the first method requires human expert to analyse constructing maps of the distribution of horizontal gradient module to obtain fronts, another tends to retrieve fronts automatically. In the area of the Medvezhinsky Rise, the results of the methods are well concerted for the period under consideration. Taking into account the spatial resolution and significant temporal averaging of satellite data, the boundary method turned out to be less informative in comparison with another one. When processing data on the distribution of sea surface temperature as close as possible to measurement dates, a period of time can be corrected for the position of hydrological stations when working in the Polar Frontal Zone area. The best result in revealing the current position of the frontal zone can be achieved with simultaneous use of contact and satellite sensing data and both front identification methods.

Keywords: Barents Sea, Polar Frontal Zone, contact and satellite data.

The work was supported funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Federal Target Program “Investigations and research in foreground directions of development of Russia’s science and technologies for 2014—2020”) for the project “Development of methods for ecosystem-based monitoring of the coastal zone and continental shelf of the Barents Sea and the High Arctic, methods for scenario modeling of emergency situations related to transport of petroleum products and radioactive waste, accompanied with and innovative technologies for marine environment protection under conditions of the marine periglacial” (Project identification number RFMEFI61616X0073, Agreement number 14.616.21.0073).

References

1. *Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G., Karsakov A. L., Antsiferov M. Yu.* Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost'. [The Barents sea waters: structure, circulation, variability]. PINRO. Murmansk, 2016, 260 p. (In Russian).
2. *Kattsov V. M., Porfir'ev B. N.* Klimaticheskie izmeneniya v Arktike: posledstviya dlya okruzhayushchei sredy i ekonomiki. [Climate changes in Arctic. Environment and economy effects]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2012, no. 2 (6), pp. 66—79. (In Russian).
3. *Matishov G. G., Volkov V. A., Denisov V. V.* O strukture tsirkulyatsii teplykh atlanticheskikh vod v severnoi chasti Barentseva moray. [On the structure of the circulation of warm Atlantic waters in the northern part of the Barents Sea]. Dokl. RAN, 1998, vol. 362, no. 4, pp. 553—556. (In Russian).
4. *Matishov G. G., Dzhenyuk S. L., Moiseev D. V., Zhichkin A. P.* Klimaticheskie izmeneniya morskikh ekosistem evropeiskoi Arktiki. [Climate changes in the marine ecosystems of the European Arctic]. Problemy Arktiki i Antarktiki, 2010, no. 3 (86), pp. 7—21. (In Russian).
5. *Ozhigin V. K.* O frontal'nykh zonakh Barentseva moray. [On frontal zones of the Barents sea]. Voprosy promyslovoi okeanologii Severnogo basseina. Sbornik nauchnykh trudov. Murmansk, PINRO, 1989, pp. 104—117. (In Russian).
6. *Rodionov V. B., Kostyanoi A. G.* Okeanicheskie fronty morei Severo-Evropeiskogo basseina. [Ocean fronts in Northern European seas]. Moscow, GEOS, 1998, 293 s. (In Russian).
7. *Fedorov K. N.* Fizicheskaya priroda i struktura okeanicheskikh frontov. [Physical nature and structure of ocean fronts]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1983, 296 p. (In Russian).
8. *Matishov G. G., Matishov D. G., Moiseev D. V.* Inflow of Atlantic-origin waters to the Barents Sea along glacial troughs. Oceanologia, 2009, vol. 51, no. 3, pp. 321—340. DOI: 10.5697/oc.51-3.321.
9. *Matishov G. G., Moiseev D. V., Lyubina O. M., Zhichkin A. P., Dzhenyuk A. L., Karamushko O. V., Frolova E. V.* Climate and cyclic hydrobiological changes of the Barents Sea from the twentieth to twenty-first centuries. Polar Biology, 2012, vol. 35, pp. 1—18. DOI: 10.1007/s00300-012-1237-9.
10. *Belkin I. M., Cornillon P. C., Sherman K.* Fronts in Large Marine Ecosystems // Progress in Oceanography, 2009, vol. 81, no. 1—4, pp. 223—236. DOI: 10.1016/j.pocean.2009.04.015.
11. *Belkin I. M., O'Reilly J. E.* An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery. J. of marine systems, 2009, vol. 78, no. 3, pp. 319—326. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.11.018.
12. *Cayula J.-F., Cornillon P.* Edge detection algorithm for SST images. J. of Atmospheric and Oceanic Technology, 1992, no. 9 (1), pp. 67—80. DOI: 10.1175/1520-0426(1992)009<0067:EDAFSI>2.0.CO;2.
13. *Karimova S.* Hydrological fronts seen in visible and infrared MODIS imagery of the Black Sea. Intern. J. of Remote Sensing, 2014, vol. 35, no. 16, pp. 6113—6134. DOI: 10.1080/01431161.2014.943327.
14. *Kirches G., Paperin M., Klein H., Brockmann C., Stelzer K.* GRADHIST — A method for detection and analysis of oceanic fronts from remote sensing data. Remote Sensing of Environment, 2016, vol. 181, pp. 264—280. DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.009.
15. *Mugo R. M., Saitoh S. I., Takahashi F., Nihira A.* Evaluating the role of fronts in habitat overlaps between cold and warm water species in the western North Pacific: A proof of concept. Deep-Sea Research Part II, 2014, vol. 107, pp. 29—39. DOI: 10.1016/j.dsr2.2013.11.005.
16. *Oerder V., Bento J. P., Morales C. E., Hormazabal S., Pizarro O.* Coastal Upwelling Front Detection off Central Chile (36.5-37°S) and Spatio-Temporal Variability of Frontal Characteristics. Remote sensing,

- 2018, vol. 10, no. 5, pp. 440–464. DOI: 10.3390/rs10050690.
17. Ping B., Su F., Du Y. Bohai front detection based on multi-scale Sobel algorithm. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, QC. Quebec City, 2014, pp. 4423–4426. DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6947472.
18. Ping B., Su F., Meng Y., Du Y., Fang S. Application of a sea surface temperature front composite algorithm in the Bohai, Yellow, and East China Seas. *Chinese J. of Oceanology and Limnology*, 2016, vol. 34, no. 3, pp. 597–607. DOI: 10.1007/s00343-015-4356-7.
19. Roa-Pascuali L., Demarcq H., Nieblas A.-E. Detection of mesoscale thermal fronts from 4 km data using smoothing techniques: Gradient-based fronts classification and basin scale application. *Remote Sensing Of Environment*, 2015, vol. 164, pp. 225–237. DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.030.
20. Sagarminaga Y., Arrizabalaga H. Relationship of Northeast Atlantic albacore juveniles with surface thermal and chlorophyll-a fronts. *Deep-Sea Research Part II*, 2014, vol. 107, pp. 54–63. DOI: 10.1016/j.dsr2.2013.11.006.
21. Stendardo I., Rhein M., Hollmann R. A high resolution salinity time series 1993–2012 in the North Atlantic from Argo and Altimeter data. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 2016, vol. 121, no. 4, pp. 2523–2551. DOI: 10.1002/2015JC011439.
22. Blackledge J. M. *Digital image processing*. Chichester, Horwood Publ., 2005, 824 p.
23. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, no. 8 (6), pp. 679–698. DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
24. Zaporozhtsev I. F., Moiseev D. V. Verifikatsiya regional'noi konfiguratsii global'noi gidrodinamicheskoi modeli dlya Azovskogo morya po dannym in situ. [Verification of global hydrodynamic model regional configuration for the Sea of Azov with in situ data]. *Nauka Yuga Rossii*, 2018, no. 1 (14), pp. 59–70. DOI: 10.23885/2500-0640-2018-14-1-59-70. (In Russian).
25. Zaporozhtsev I. F., Moiseev D. V. Otsenka vremennoi izmenchivosti zatoka atlanticheskikh vod v Barentsevo more po termokhalinnyim dannym razreza "Kol'skii meridian": s 1970 g. do nashikh dnei. *Protsessy v geosredakh*, 2018, no. 3 (17), pp. 223–224. (In Russian).
26. Kostyanoi A. G. Sputnikovyi monitoring klimaticheskikh parametrov okeana. Ch. 2. [Satellite monitoring of the ocean climate parameters. Part 1]. *Fundament. i priklad. klimatologiya*, 2017, vol. 3, pp. 57–64. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-3-57-64.

Information about authors

Moiseev Denis Vitalyevich, PhD of Geography, Deputy Director of Science, Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences (17, Vladimirskaia St., Murmansk, Russia, 183010), e-mail: denis_moiseev@mmbi.info.

Zaporozhtsev Ivan Fedorovich, PhD of Engineering Science, Associated Professor, Department of Mathematics, Physics and Information Technologies, Murmansk Arctic State University; Researcher, Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences (17, Vladimirskaia St., Murmansk, Russia, 183010), e-mail: zaporozhtsev.if@gmail.com.

Maximovskaya Tatyana Mikhailovna, Intern Researcher, Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences (17, Vladimirskaia St., Murmansk, Russia, 183010), e-mail: maximovskaja.t@yandex.ru.

Dukhno Georgy Nikitich, Junior Researcher, Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences (17, Vladimirskaia St., Murmansk, Russia, 183010), e-mail: dukhno@mmbi.info.

Bibliographic description

Moiseev D. V., Zaporozhtsev I. F., Maximovskaya T. M., Dukhno G. N. Identification of frontal zones position on the surface of the Barents Sea according to in situ and remote sensing data (2008–2018). *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 2 (34), pp. 48–63. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-48-63. (In Russian).