

## ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 551.465 (268.46)

### СТРУКТУРА И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОСНОВНЫХ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН В БЕЛОМ МОРЕ В ТЕПЛЫЙ СЕЗОН 2010 ГОДА

**А. В. Зимин<sup>1,2</sup>, А. В. Толстикова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

Анализ архивных спутниковых снимков температуры поверхности моря с мая по сентябрь 2010 года позволил впервые установить черты декадной изменчивости фронтальных зон. Показано, что области, где встречаются экстремальные значения градиентов температуры моря и, соответственно, проявляются поверхностные фронты, занимают значительную площадь моря, локализованную около среднего положения фронтальных линий. В Двинском заливе эта область занимает почти две трети акватории залива, а величина смещения стокового фронта на его западном фланге достигает за месяц 70 км. Все фронты испытывают наибольшие перемещения в первой половине теплого сезона под влиянием синоптических процессов и речного стока на фоне еще недостаточного прогрева верхнего слоя, однако их высокая динамическая активность сохраняется и позже, проявляясь в виде образования языков и меандров размерами до нескольких десятков километров. Наибольшая изменчивость поля температуры в виде возмущений фронтального раздела присуща зоне Горла, и эта динамика является важным элементом водообмена в проливе.

Ключевые слова: Белое море; температура поверхности моря; градиент; фронтальная зона; фронт; синоптическая динамика.

#### **A. V. Zimin, A. V. Tolstikova. STRUCTURE AND VARIABILITY OF THE MAIN FRONTAL ZONES IN THE WHITE SEA DURING THE WARM SEASON 2010**

Analysis of archival satellite images of sea surface temperature from May to September 2010 allowed determining the features of the synoptic variability of these frontal zones. It is shown that the regions where extreme values of the sea temperature gradients and surface fronts occur occupy a significant sea area near the middle position of the frontal lines. In Dvinskiy Bay, this region occupies almost two thirds of the bay's water area, and the displacement of the runoff front in its western flank reaches 70 km per month. All the fronts undergo the largest displacements in the first half of the warm season under the influence of synoptic processes and river runoff against the background of insufficient

heating of the upper layer, but their high dynamic activity persists later, manifesting itself in the form of the formation of tongues and meanders up to several tens of kilometers. The greatest variability of the temperature field in the form of perturbations of the frontal section is demonstrated by the Gorlo frontal zone. This dynamics is an important element of water exchange in the strait.

**Key words:** White Sea; sea surface temperature; gradient; frontal zone; front; synoptic dynamics.

## Введение

Фронтальные зоны представляют собой переходные области между водами с различными свойствами и характеризуются сложной внутренней структурой. В качестве признака фронтальной зоны обычно понимается существенное, на порядок, обострение горизонтальных градиентов по сравнению с климатическим значением. Внутри относительно широкой переходной области выделяется узкая поверхность или несколько поверхностей с экстремальными значениями градиентов, называемые фронтальными разделами [Федоров, 1983]. Их пересечение с поверхностью моря образует фронты, которые можно легко проследить, например, на картах температуры поверхности моря (ТПМ) в виде зоны схождения изотерм. Применение данных спутниковых дистанционных наблюдений за ТПМ, охватывающих значительные акватории, позволило перейти к широкомасштабным наблюдениям за характеристиками фронтальных зон [Федоров, 1983].

В Белом море фронтальные зоны образуются под влиянием речного стока, приливов и сезонного прогрева [Гидрометеорология..., 1991], в результате чего формируются стоковые (в Двинском и Онежском заливах) и шельфово-приливные (в проливе Горло и вокруг Соловецких островов) фронты. Первый вид, стоковые разделы, образуются в местах впадения крупных рек или в их эстуариях. Такие фронты возникают на границе потока речных вод и часто являются соленосными, так как отделяют распресненные прибрежные воды от более соленых вод открытого моря. Они обычно характеризуются более резкими градиентами плотности и более узкие по ширине, чем чисто температурные фронты. Второй вид – шельфово-приливные (или структурные, по: [Пантюлин, 2012]) фронты – являются границей между стратифицированными и перемешанными водами моря. В Белом море существует два района с такими фронтами – Горло и район Соловецких островов.

У структурных (также традиционно называемых «приливные») и стоковых фронтов опреде-

лено положение за летний сезон и отмечается их изменчивость, однако в представлениях об их изменчивости существуют большие пробелы, заполнить которые возможно только используя спутниковые наблюдения. Все фронты в теплый период года, с мая по сентябрь, четко прослеживаются по ТПМ (рис. 1), получаемой со спутников [Родионов и др., 2014]. Применение данных дистанционных наблюдений позволило обнаружить значительную для всего моря мезомасштабную изменчивость ТПМ [Ионов, Шилов, 1996] и положения идентифицируемых по ней фронтальных разделов [Романенков и др., 2016].

Однако, несмотря на констатацию факта наличия значительной изменчивости положения фронтальных разделов, системное описание характеристик фронтальных зон в течение всего теплого периода года, когда фронты прослеживаются в поле ТПМ, отсутствует, хотя такие исследования представляются особо актуальными для понимания функционирования экосистемы моря и распределения биоресурсов. В первую очередь это связано с особенностями расположения моря в высоких широтах, из-за чего над ним наблюдается высокая повторяемость облачности и обеспеченность качественными снимками в оптическом диапазоне спектра неоднородна во времени. По этой причине изменчивость поверхностных проявлений фронтальных разделов исследовалась по осредненным данным, с использованием алгоритмов восстановления [Pozdnyakov et al., 2008], что позволяет получить лишь приблизительную географическую привязку положения фронтов и оценку их характеристик. Уникальная синоптическая ситуация, сложившаяся летом 2010 года, связанная с влиянием устойчивого антициклона, расположившегося над Европейской частью России, впервые позволила получить архив карт ТПМ для акватории моря с минимальным влиянием облачности за весь теплый период года. Уникальный архив ТПМ за 2010 год и лег в основу работы.

Цель работы – описать пространственно-временную изменчивость фронтальных разделов на акватории Белого моря в течение всего теплого сезона (с мая по сентябрь) с де-

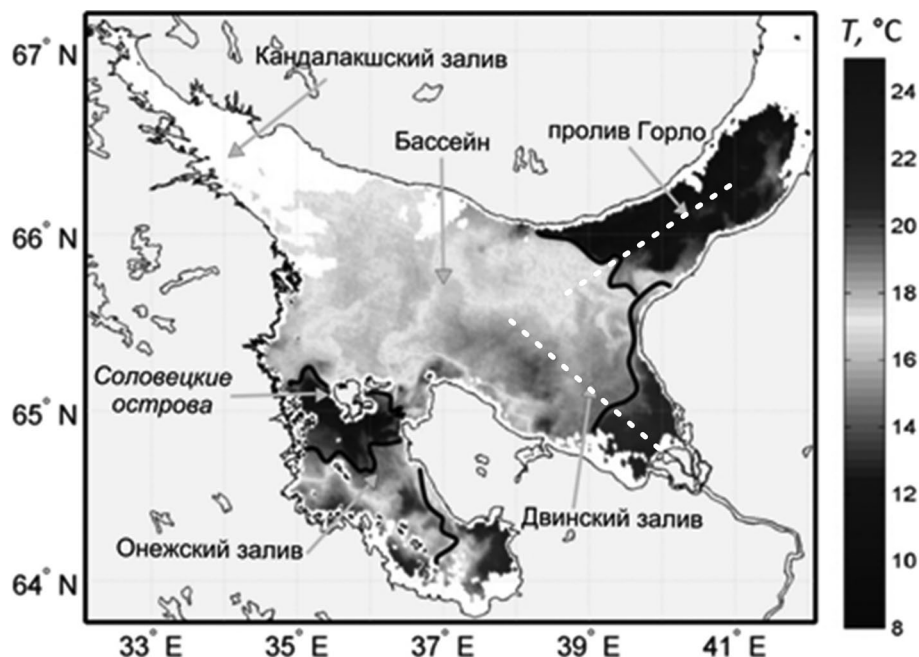


Рис. 1. Температура поверхности Белого моря 04.08.2010/09:10 UTC со спутника Terra. Белые области на карте – районы, закрытые облачностью. Положение поверхностных фронтов показано черными линиями. Пунктирными белыми линиями нанесено положение разрезов ТПМ

Fig. 1. Temperature at the surface of the White Sea 04.08.2010/09:10 UTC from Terra satellite. White colour on the map shows the cloud-covered areas. The location of surface fronts is shown by black lines. White dashed lines indicate the location of the SST sections

сятидневной (синоптической) дискретностью по данным ТПМ.

### Материалы и методы

Для изучения пространственно-временной изменчивости проявлений фронтальных разделов применялись ИК-изображения MODIS со спутников Terra и Aqua. Исходные данные брались с интернет-портала Ocean Colour Web (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) в виде Sea Surface Temperatures (SST) снимков уровня обработки L2 с разрешением по пространству около 1 километра. На предварительном этапе работы был проведен выборочный анализ доступной спутниковой информации по району Белого моря, полученной за теплый сезон с 2009 по 2016 гг. Наибольшее количество свободных от облачности спутниковых изображений было получено в 2010 г., они и были использованы в дальнейшем. Обрабатывались данные за дневное время суток с 1 мая по 30 сентября 2010 года.

В настоящей работе использовалось три типа данных: температура поверхности водных объектов (MOD28); маска облаков (MOD35); результаты мониторинга снежного и ледяно-

го покрова (MOD10, 29). Процедура обработки SST-изображений проводилась в несколько этапов. На первом этапе из архива выбирались снимки с достаточной открытостью водной поверхности и с центральным положением в снимке района исследования. На втором этапе подбирались критерии для максимального маскирования облачности и льдов. На третьем этапе выполнялось наложение маски на снимок SST и интерполяция его на стандартную матрицу размерами 550 на 560 км с шагом 1 км, а также наложение карты берега. Четвертый этап заключался в обработке полученной матрицы путем осреднения по декадам всех попавших в одну ячейку значений температуры, после чего вычислялся ее градиент. Градиент оценивался как корень квадратный из суммы квадратов зональной и меридиональной составляющей градиента ТПМ. Ячейки, в которых информация за декаду не поступала, в расчетах не участвовали. Обеспеченность снимками составила в среднем 15 штук за декаду (при минимальном количестве 5 снимков на декаду), при средней открытости снимка около 28 % акватории моря. Всего было обработано 205 снимков, что позволило построить карты ТПМ и ее градиентов по декадам.

По картам среднедекадных градиентов ТПМ выделялись области максимумов, которые идентифицировались как фронтальные зоны. Внутри каждой фронтальной зоны выбирались характерные изотермы ТПМ, соответствующие положению самого интенсивного фронтального раздела, выделенного по карте градиентов. Используя положения характерных изотерм, определяли линию основного фронта для каждой декады. Для идентификации положения фронтальных зон в поле градиента ТПМ использовали критерий двукратного превышения градиента во фронтальной зоне над фоновым градиентом для всего моря, аналогично тому, как это делалось в работе [Ожигин и др., 2016].

Сразу оговоримся, что ширина зоны максимального горизонтального градиента ТПМ во фронтальных зонах меняется согласно работе [Федоров, 1983] от десятков метров до километров. Так как в методике обработки данных использовались значения, осредненные по декадам, они являются заниженными в сравнении с отмечаемыми по данным разовых спутниковых снимков градиентами температуры во фронтальных зонах.

### **Временная изменчивость характеристик фронтальных зон**

В поле градиентов ТПМ нашли отражение все четыре основные фронтальные зоны Белого моря: стоковые (Северной Двины и Онеги), приливные или структурные (Горла и Соловецких островов). Фоновый градиент ТПМ в среднем составил менее  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . При этом средний градиент в областях фронтальных зон равнялся  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Наиболее интенсивными с точки зрения значений градиента (до  $0,59\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ ) были районы Онежского залива и Горла. Наименее интенсивно в градиенте ТПМ было отображено положение зоны стокового фронта в Двинском заливе.

Полученное поле градиентов ТПМ позволило выявить многофронтальность рассматриваемых зон. Структуры фронтальных зон в Белом море чаще имели «ступенчатый» [по: Федоров, 1983] характер и состояли из однородных участков, разделенных фронтами одного знака. Пример подобной фронтальной зоны, проявляющейся на разрезе ТПМ в Двинском заливе, представлен на рис. 2, а, где область со «ступенчатой» фронтальной зоной наблюдается с 0 по 80 км разреза. «Перебегающий» характер [по: Федоров, 1983] фронтальных зон, для которого характерно чередование холодных и теплых участков различной интенсивности, разделенных фронтами, чаще всего отмечался в Горловской фронтальной

зоне. Область с «перебегающей» фронтальной зоной наблюдается с 60 по 110 км разреза ТПМ, представленного на рис. 2, б.

Особенно наглядно многофронтальность проявлялась на южной границе Горла и в Онежском заливе, где ширина фронтальных зон колеблется от 40 до 60 километров и включает в себя 4–6 фронтов. В качестве примера приведем характеристики изменчивости Горловской фронтальной зоны за теплый сезон вдоль разреза ТПМ в центральной части пролива (табл. 1).

Из таблицы 1 видно, что средняя ширина фронтальной зоны составляет 45 км, максимальной ширины она достигает в середине лета во 2–3 декаде июля. Средний перепад температуры во фронтальной зоне составляет  $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , максимум около  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  отмечается в конце июля, в августе, минимальный перепад около  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  отмечается в мае и сентябре.

Структура фронтальной зоны в половине случаев имеет «перебегающий» характер. В подобном случае внутри фронтальной зоны отмечается от 3 до 6 фронтальных разделов, средняя ширина которых около 6 км с локальными градиентами от  $0,12$  до  $0,59\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . В других случаях структура фронтальной зоны имела «ступенчатый» характер. В подобных случаях внутри фронтальной зоны выделялись 2–3 ступеньки протяженностью 10–20 км с достаточно равномерным распределением температуры. Средняя ширина фронтальных разделов составляла около 4 км, градиент  $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ .

Самая обширная по площади и протяженная фронтальная зона, хотя местами не так ярко выражена, связана с Двинским течением и проявляется в Двинском заливе и восточной границе Горла. Количество фронтальных разделов внутри этой зоны в зависимости от района колеблется от 1 до 5. Представление об изменчивости характеристик фронтальных зон в течение летнего сезона в Двинском и Онежском заливе можно получить из таблиц 2 и 3. Внутрисезонный ход прослеживался в характеристиках обеих фронтальных зон. Лучше всего он отражался в среднем фронтальном градиенте температуры в Онежском заливе. Наибольшая интенсивность фронтальных разделов в обоих заливах отмечалась в июле. Средняя ширина фронта на поверхности в Двинском заливе около 14 км, в Онежском – около 9 км. В Двинском заливе ширина фронтальной зоны в среднем составляла 95 км, в Онежском – менее 40 км, что связано с объемом стока рек. Средний перепад температуры через фронтальную зону был  $5,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в Двинском заливе и  $4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  в Онежском. Средний зональный градиент в Онежском заливе выше почти в два раза.

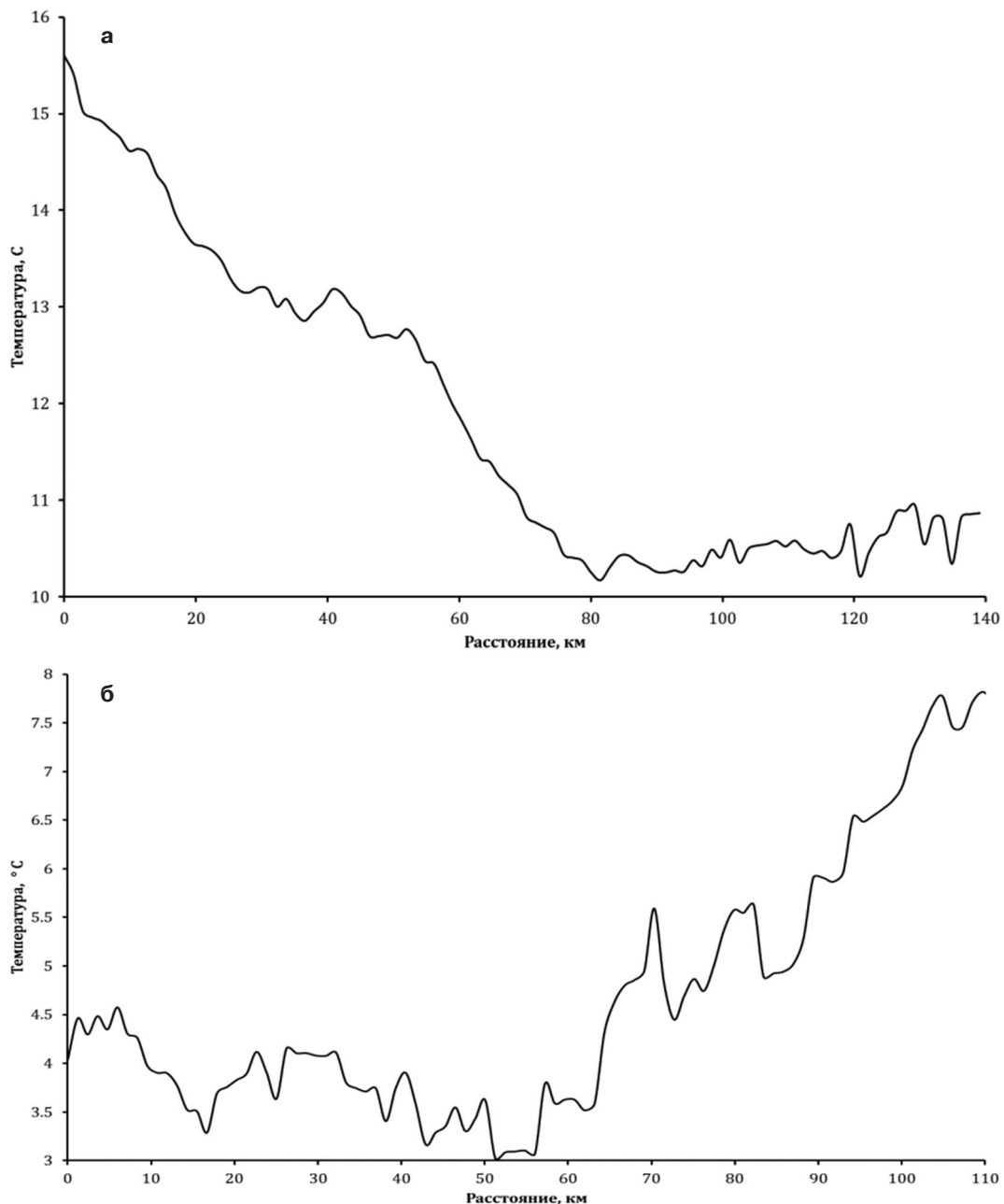


Рис. 2. Распределение ТПМ на разрезе от устья реки Северная Двина до границы Двинского залива и Бассейна по данным за третью декаду июня 2010 года (а) и на разрезе через пролив Горло по данным за первую декаду июля 2010 года (б). Положение разрезов на карте показано на рис. 1

Fig. 2. SST distribution on the section from the Northern Dvina River mouth to the border of Dvinskiy Bay and Basin according to the data for the third ten-day period of June, 2010 (a) and on the section across the Gorlo strait according to the data for the first ten-day period of July, 2010 (b). Sections location is shown in Fig. 1

В качестве обобщения отметим, что описанные зоны стоковых фронтов имеют общие черты: низкий средний зональный градиент; максимальный охват по площади акватории наблюдается в июне; имеются несколько фронтальных разделов; фронты быстро меняют свое положение при интенсивном воздействии вет-

ра, по данным сопоставления с архивом NCEP/NCAR. Среднее расстояние между фронтами внутри фронтальных зон составляет до нескольких десятков километров.

Около Соловецких островов фронтальная зона представляет собой весьма сложную двойную структуру. В районе проливов Запад-



Таблица 1. Сравнительные характеристики структуры Горловской фронтальной зоны

Table 1. Comparative characteristics of the structure of the Gorlo frontal zone

Время: декада, месяц Time: ten-day period, month	Ширина фронтальной зоны, км Width of the frontal zone, km	Среднезональный градиент, °С/км Average zonal gradient, °C/km	Характер структуры, число основных фронтальных разделов Character of the structure, number of main frontal sections	Фронтальный градиент средний, min–max °С/км Average frontal gradient, min–max °C/km
2, май 2, May	39	0,08	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,22 (0,12–0,28)
1, июнь 1, June	52	0,07	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,31 (0,23–0,38)
2, июнь 2, June	48	0,09	Перебегающий, 5 Alternating, 5	0,20 (0,14–0,28)
3, июнь 3, June	41	0,10	Перебегающий, 5 Alternating, 5	0,27 (0,14–0,45)
1, июль 1, July	48	0,11	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,28 (0,24–0,31)
2, июль 2, July	56	0,11	Перебегающий, 5 Alternating, 5	0,33 (0,20–0,58)
3, июль 3, July	57	0,12	Перебегающий, 6 Alternating, 6	0,34 (0,22–0,48)
1, август 1, August	36	0,14	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,30 (0,29–0,30)
2, август 2, August	40	0,17	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,38 (0,29–0,53)
3, август 3, August	38	0,09	Перебегающий, 3 Alternating, 3	0,13 (0,13–0,15)
1, сентябрь 1, September	40	0,08	Перебегающий, 3 Alternating, 3	0,12 (0,12–0,13)
2, сентябрь 2, September	47	0,07	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,12 (0,12–0,13)

Таблица 2. Сравнительные характеристики структуры Двинской фронтальной зоны

Table 2. Comparative characteristics of the structure of the Dvina frontal zone

Время: декада и месяц Time: ten-day period, month	Ширина фронтальной зоны (ФЗ), км Width of the frontal zone (FZ), km	Среднезональный градиент ФЗ, °С/км Average zonal gradient, °C/km	Характер структуры, число основных фронтальных разделов Character of the structure, number of main frontal sections	Фронтальный градиент средний, min–max °С/км Average frontal gradient, min–max °C/km
1, май 1, May	93	0,06	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,19 (0,14–0,28)
2, май 2, May	143	0,07	Перебегающий, 3 Alternating, 3	0,16 (0,12–0,18)
3, май 3, May	101	0,05	Перебегающий, 3 Alternating, 3	0,18 (0,11–0,21)
2, июнь 2, June	81	0,07	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,16 (0,15–0,16)
3, июнь 3, June	81	0,07	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,13 (0,12–0,14)
1, июль 1, July	103	0,05	Перебегающий, 3 Alternating, 3	0,21 (0,11–0,28)
2, июль 2, July	84	0,07	Перебегающий, 3 Alternating, 3	0,15 (0,12–0,27)
3, июль 3, July	86	0,05	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,14 (0,14–0,14)
1, август 1, August	114	0,05	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,13 (0,11–0,22)
2, август 2, August	71	0,06	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,18 (0,16–0,27)

Таблица 3. Сравнительные характеристики структуры Онежской фронтальной зоны

Table 3. Comparative characteristics of the structure of the Onega frontal zone

Время: декада и месяц Time: ten-day period, month	Ширина фронтальной зоны, км Width of the frontal zone, km	Среднезональный градиент ФЗ, °С/км Average zonal gradient, °C/km	Характер структуры, число основных фронтальных разделов Character of the structure, number of main frontal sections	Фронтальный градиент средний, min–max °С/км Average frontal gradient, min–max °C/km
1, май 1, May	51	0,05	Переменяющийся, 3 Alternating, 3	0,15 (0,12–0,17)
2, май 2, May	39	0,09	Переменяющийся, 3 Alternating, 3	0,16 (0,11–0,18)
1, июнь 1, June	40	0,08	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,22 (0,19–0,31)
2, июнь 2, June	41	0,12	Переменяющийся, 3 Alternating, 3	0,23 (0,20–0,27)
3, июнь 3, June	40	0,15	Переменяющийся, 3 Alternating, 3	0,23 (0,21–0,26)
1, июль 1, July	37	0,20	Ступенчатый, 2 Stepped, 2	0,23 (0,22–0,23)
2, июль 2, July	41	0,18	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,30 (0,21–0,59)
3, июль 3, July	49	0,08	Ступенчатый, 3 Stepped, 3	0,18 (0,17–0,29)
1, август 1, August	52	0,08	Переменяющийся, 3 Alternating, 3	0,13 (0,11–0,28)

ная и Восточная Соловецкие салмы и северной части Онежского залива наблюдается зона с низкими значениями температур на поверхности. Образование этой зоны связано с интенсивным приливным перемешиванием в проливах и на мелководье. Южнее этой области, в районах, где интенсивность приливно-отливного потока ослабевает, перемешивание становится менее интенсивным, стратификация выражена лучше и поверхностный слой содержит менее соленые и более теплые воды. В результате область структурного фронта в данном районе включает в себя два фронтальных раздела: северный и южный. Она является буфером из нестратифицированных вод, разделяющих воды Бассейна и Онежского залива.

Представление об изменчивости фронтов в течение летнего сезона по усредненным данным разрезов ТПМ в Западной и Восточной Соловецких салмах можно получить из таблицы 4. В характеристиках фронтальных зон прослеживался четко выраженный сезонный ход. Фронты начинали формироваться в мае, а разрушались в сентябре. Наибольшие градиенты на фронтах отмечались в первой декаде августа. Всегда четко прослеживался фронт в области северной части Соловецкой фронтальной зоны. Изменение характеристик ветра не оказывало значительного влияния на динамику фронтальной зоны. Она испытывала только слабые вариации на южном фронтальном разделе.

### Пространственная изменчивость основных фронтальных разделов

Результаты выделения положения основного фронтального раздела внутри каждой фронтальной зоны за сезон и по декадам для каждого месяца приведены на рис. 3.

Из рис. 3, а, видно, что фронт располагается поперек пролива Горло зигзагообразной линией. Особенно сложно идентифицировать его положение около Зимнего берега, где он взаимодействует со стоковым фронтом реки Северная Двина. Декадное положение фронта по месяцам (рис. 3, б–е) показывает его меандрирующий характер. Несмотря на значительную локальную изменчивость его положения по декадам, все колебания фронта прослеживаются около его климатического положения на южной границе Горла. Образование языков и меандров размером до нескольких десятков километров наиболее четко наблюдается в августе (рис. 3, д), когда фронт особенно ярко прослеживается в поле градиентов температуры (табл. 1).

Наиболее интенсивная пространственная динамика характерна для Двинского стокового фронта в части, прилегающей к Летнему берегу. В течение мая граница фронта сдвигается к западу более чем на 70 км. Столь значительная изменчивость положения фронтальных разделов в Двинском заливе может являться

Таблица 4. Сравнительные характеристики структуры Соловецкой фронтальной зоны

Table 4. Comparative characteristics of the structure of the Solovetsky frontal zone

Время: декада, месяц Time: ten-day period, month	Часть фронтальной зоны Part of the frontal zone	Ширина фронта средняя, км Average width of the front, km	Фронтальный градиент средний, °С/км Average frontal gradient, °C/km
2, май 2, May	Северная Northern	12	0,09
	Южная Southern	14	0,07
3, май 3, May	Северная Northern	12	0,11
	Южная Southern	15	0,10
2, июнь 2, June	Северная Northern	12	0,18
	Южная Southern	11	0,12
3, июнь 3, June	Северная Northern	10	0,17
	Южная Southern	11	0,15
1, июль 1, July	Северная Northern	10,	0,21
	Южная Southern	11,	0,19
2, июль 2, July	Северная Northern	12	0,20
	Южная Southern	10	0,19
3, июль 3, July	Северная Northern	12	0,27
	Южная Southern	10	0,17
1, август 1, August	Северная Northern	11	0,32
	Южная Southern	9	0,31
2, август 2, August	Северная Northern	12	0,31
	Южная Southern	9	0,29
3, август 3, August	Северная Northern	14	0,12
	Южная Southern	13	0,11
1, сентябрь 1, September	Северная Northern	14	0,11
	Южная Southern	14	0,10
2, сентябрь 2, September	Северная Northern	14	0,10
	Южная Southern	14	0,08

источником развития интенсивного вихреобразования.

Во фронтальной зоне около Соловецких островов северный и южный фронт имеют обозна-

чения чисто условные. Вследствие отбраковки данных спутниковых наблюдений в прибрежной 5-километровой зоне проследить положение фронта севернее архипелага не всегда



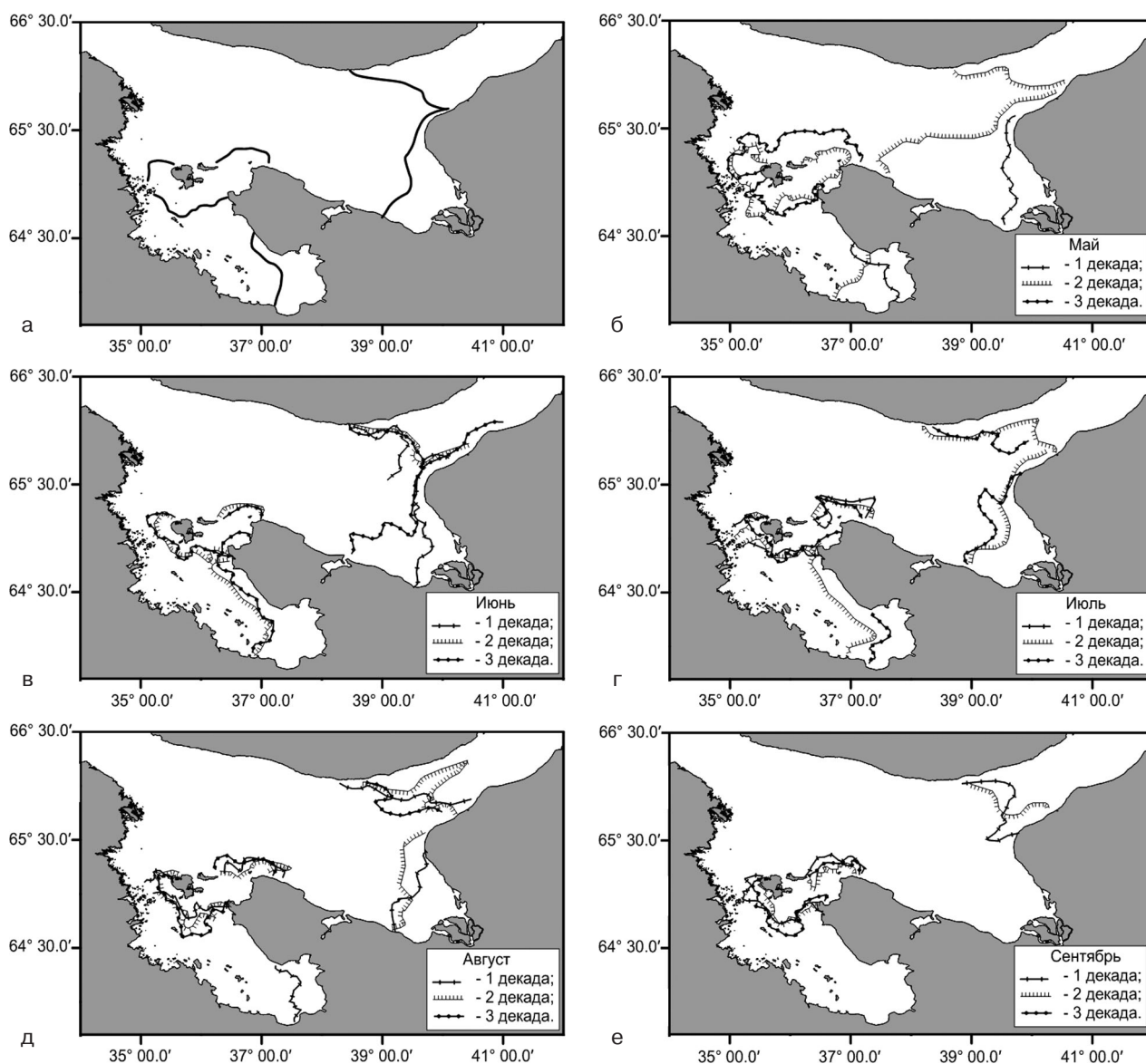


Рис. 3. Схемы расположения основных фронтов по данным спутниковых наблюдений в Белом море за теплый сезон (а) и с мая по сентябрь (б–е) за 2010 год

Fig. 3. Schematic maps of the main fronts according to the data of the satellite observation over the White Sea during the warm period (a) and from May to September (б–е) in 2010

представляется возможным. В этом случае северный фронт условно разделялся на фронтальные разделы Западной и Восточной Соловецких салм. Причем в отдельные декады в Западной Соловецкой салме северный и южный раздел могут смыкаться, образуя фронт, направленный вдоль оси пролива.

Стоковый фронт в южной вершине Онежского залива имеет дугообразную форму и прижат к Лямецкому берегу. Его положение может за декаду изменяться более чем на 25 километров и, соответственно, сильно отклоняться от среднего.

Из описания следует, что все фронты испытывают наибольшие перемещения в первой по-

ловине теплого сезона под влиянием, очевидно, синоптических процессов и речного стока на фоне недостаточного прогрева верхнего слоя, однако их высокая динамическая активность сохраняется и позже, проявляясь в виде образования языков и меандров размером до нескольких десятков километров.

### Заключение

Проведенный анализ показал, что все четыре основные фронтальные зоны Белого моря четко прослеживались в поле ТПМ, при этом ширина фронтальных зон колеблет-

ся от 10 до 140 километров и включает в себя от 1 до 6 фронтов, максимальные градиенты на фронтах прослеживаются в июле-августе. Структуры фронтальных зон чаще всего имели «ступенчатый» характер. Характерный градиент ТПМ на фронте составлял от 0,1 до 0,6 °С/км. Декадная изменчивость градиента температур на фронте максимальна в Горловской фронтальной зоне и достигает 0,3 °С. Все фронты испытывают наибольшие перемещения в первой половине теплого сезона. Смещение за декаду может достигать 40 километров, а за месяц 70 километров.

Использование уникального архива ТПМ, охватывающего весь теплый период (май–сентябрь) 2010 года, показало, что наряду с сезонной и приливной динамикой значительную роль в изменчивости фронтальных разделов в Белом море играют процессы синоптического масштаба различного генезиса. Использование декадных данных представляется оптимальным для корректной оценки внутрисезонного хода фронтальной динамики в Белом море.

Авторы выражают благодарность И. Е. Козлову и О. А. Атаджановой за помощь в обработке спутниковых данных.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

## Литература

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б. Х. Глуховского. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 240 с.

## References

*Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR. T. 2. Beloe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya* [Hydrometeorology and hydrochemistry of the Seas of the USSR. Vol. 2. The White Sea. Part 1: Hydrometeorological conditions]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 240 p.

Fedorov K. N. Fizicheskaya priroda i struktura okeanicheskikh frontov [Physical nature and structure of oceanic fronts]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 296 p.

Filatov N. N., Terzhevnik A. Yu. Beloe more i ego vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov [The White Sea and its catchment area under the influence of climate and man-induced impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. 335 p.

Ionov V. V., Shilov I. O. Osobennosti rasprostraneniya rechnykh vod i dinamiki okeanologicheskikh frontov v Belom more po rezul'tatam sputnikovykh IK-izmere-

Zimin A. V. Zakonomernosti submезомасштабных процессов и явлений в Белом море // Ученые записки РГМУ. 2016. № 44. С. 104–120.

Ionov V. V., Shilov I. O. Osobennosti rasprostraneniya rechnykh vod i dinamiki okeanologicheskikh frontov v Belom more po rezul'tatam sputnikovykh IK-izmereniy i naturnym nablyudeniyam v letniy period // Vestnik SPbGU. 1996. Ser. 7. Vyp. 2, № 14. С. 53–61.

Pantulyin A. N. Struktura i dinamika vodnogo tela Belogo morya. Dinamika, struktura i vodnye massy // Sistema Belogo morya. Tom II. Vodnaya tolsha i vzaimodeystvuyushchaya s nei atmosfera, kriosfera, rechnoy stok i biosfera. M.: Nauchnyy mir, 2012. С. 309–379.

Rodiонов А. А., Романенков Д. А., Зимин А. В., Козлов И. Е., Шапрон Б. Субмезомасштабные структуры вод Белого моря и их динамика. Состояние и направления исследований // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 3. С. 29–41.

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.

Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 296 с.

Filatov N. N., Terzhevnik A. Yu. Beloe more i ego vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov. Petrozavodsk: KarNЦ РАН, 2007. 335 с.

Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G., Karsakov A. L., Antsiferov M. Yu. Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost'. Murmansk: PINRO, 2016. 260 с.

Pozdnyakov D., Korosov A., Pettersson L. H. Visible and infrared remote sensing of the White Sea Bio-Geo-Chemistry and Hydrology // Remote Sensing of the European Seas. 2008. P. 129–140.

Поступила в редакцию 16.07.2018

nii i naturnym nablyudeniyam v letniy period [Features of the river waters distribution and oceanographic fronts dynamics in the White Sea according to the results of the satellite IR images and field observations in summer]. *Vestnik SPbGU* [Vestnik of St. Petersburg Univ.]. 1996. Ser. 7, iss. 2, no. 14. P. 53–61.

Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G., Karsakov A. L., Antsiferov M. Yu. Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost' [Waters of the Barents Sea: structure, circulation, and variability]. Murmansk: PINRO, 2016. 260 p.

Pantulyin A. N. Struktura i dinamika vodnogo tela Belogo morya. Dinamika, struktura i vodnye massy. Sistema Belogo morya. T. II. Vodnaya tolshcha i vzaimodeystvuyushchaya s nei atmosfera, kriosfera, rechnoi stok i biosfera [Structure and dynamics of the water body of the White Sea. The dynamics, structure, and wa-

ter masses. The White Sea System. Vol. II. Water column and interaction with atmosphere, cryosphere, biosphere, and river flow]. Moscow: Nauchnyi mir, 2012. P. 309–379.

Rodionov A. A., Romanenkov D. A., Zimin A. V., Kozlov I. E., Shapron B. Submezomasshtabnye struktury vod Belogo morya i ikh dinamika. Sostoyanie i napravleniya issledovaniy [Submesoscale processes and their dynamics in the White Sea. State of the art and future research]. *Fund. i priklad. gidrofizika* [Fund. Appl. Hydrophysics]. 2014. Vol. 7, no. 3, P. 29–41.

Romanenkov D. A., Zimin A. V., Rodionov A. A., Atadzhanova O. A., Kozlov I. E. Izmenchivost' frontal'nykh razdelov i osobennosti mezomasshtabnoi dinamiki vod Belogo morya [Variability of frontal sections and fea-

tures of mesoscale dynamics of the White Sea waters]. *Fund. i priklad. gidrofizika* [Fund. Appl. Hydrophysics]. 2016. Vol. 9, no. 1. P. 59–72.

Zimin A. V. Zakonomernosti submezomasshtabnykh protsessov i yavlenii v Belom more [Patterns of submesoscale processes and phenomena in the White Sea]. *Uchenye zapiski RGGMU* [Proceed. Russ. St. Hydrometeorological Univ.]. 2016. No. 44. P. 104–120.

Pozdnyakov D., Korosov A., Pettersson L. H. Visible and infrared remote sensing of the White Sea Bio-Geo-Chemistry and Hydrology. *Remote Sensing of the European Seas*. 2008. P. 129–140.

Received July 16, 2018

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Зимин Алексей Вадимович**

руководитель лаб. геофизических пограничных слоев, главный научный сотрудник, д. г. н. Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997

ведущий научный сотрудник  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: zimin2@mail.ru

### **Толстик Алексей Владимирович**

руководитель лаб. географии и гидрологии, старший научный сотрудник, к. г. н. Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН» пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030 эл. почта: alexeytolstikov@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### **Zimin, Aleksey**

P. P. Shirshov Institute of Oceanology,  
Russian Academy of Sciences  
36 Nakhimovsky Pr., 117997 Moscow, Russia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: zimin2@mail.ru

### **Tolstikov, Aleksey**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: alexeytolstikov@mail.ru