

УДК 551.465.62.

© А. А. Коник^{1,2}, А. В. Зимин^{1,3}, О. А. Атаджанова¹

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

³Санкт-Петербургский государственный университет
konikrshu@gmail.com

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ В РАЙОНЕ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН КАРСКОГО МОРЯ

Статья поступила в редакцию 03.05.2018, после доработки 12.11.2018.

Описана внутрисезонная изменчивость основных фронтов внутри Стоковой (связанной с влиянием рек Оби и Енисея) и Прикромочной (связанной с таянием арктических льдов) фронтальных зон Карского моря с июля по сентябрь в 2007 и 2011 гг. Выполнены оценки ширины и максимального градиента температуры поверхности моря в этих фронтальных зонах. В качестве исходных данных использовались поля температуры поверхности моря и рассчитанные по ним градиенты из продукта GHRSSST OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis. Установлено, что в поле градиентов температуры поверхности моря фронтальные зоны распадаются на отдельные контрастные пятна, и для выделения их на акватории всего моря требуется совмещение данных по градиентам и температуры поверхности моря, что потребовало разработки отдельной методики. Показана сложная структура фронтальных зон и значительная пространственно-временная изменчивость положения их основных фронтов. Установлено, что в сентябре отмечается пик внутрисезонной динамики у Прикромочного фронта, а в августе — у Стокового фронта. В другие месяцы внутрисезонная динамика выражается в меандрировании положения Прикромочного и Стокового фронта. Выявлено, что в рассматриваемые годы средний градиент температуры внутри Стоковой фронтальной зоны составляет 0.029 °C/км, при ширине около 137 км, а в Прикромочной — 0.027 °C/км при ширине почти 104 км.

Ключевые слова: температура поверхности моря, градиент температуры, Стоковая и Прикромочная фронтальные зоны, фронтальные разделы, Карское море.

A. A. Konik^{1,2}, A. V. Zimin^{1,3}, O. A. Atadzhanova¹

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, St.-Petersburg, Russia

³St.-Petersburg State University, Russia

QUANTITATIVE ESTIMATIONS OF THE VARIABILITY OF CHARACTERISTICS OF THE TEMPERATURE OF THE SEA SURFACE IN THE FRONT OF THE FRONTAL ZONE OF THE KARA SEA

Received 03.05.2018, in final form 12.11.2018.

The paper describes monthly and intra-seasonal dynamics of the major fronts in the River Plums and the Marginal Ice Arctic frontal zones in the Kara Sea in the warm period from July to September 2007 and 2011. Quantitative characteristics of these frontal zones are estimated. The sea surface temperature fields and the gradients calculated from them from the product GHRSSST OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis are used as the initial data. It is established that the frontal zones break up into separate contrast spots in the gradient field, and to separate them into the entire sea, aggregation of data over gradients and temperatures is required, which required the development of a separate technique. The complex structure of the frontal zones and the considerable spatio-temporal variability of the position of their main fronts are shown. Two main frontal zones are identified in the water area of the sea: the River Plums associated with the

Ссылка для цитирования: Коник А. А., Зимин А. В., Атаджанова О. А. Количественные оценки изменчивости характеристик температуры поверхности моря в районе фронтальных зон Карского моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 1. С. 54—61.

For citation: Konik A. A., Zimin A. V., Atadzhanova O. A. Quantitative estimations of the variability of characteristics of the temperature of the sea surface in the front of the frontal zone of the Kara Sea. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 1, 54—61.

doi: 10.7868/S2073667319010076

influence of the rivers Ob and Yenisei and the Marginal Ice Arctic front, connected with the melting of Arctic ice. In the conditions of the modern climate, a significant dynamics of the River Plums front variation and a relatively stable position of the Marginal Ice Arctic front are established. It is shown that the intra-seasonal dynamics in the Marginal Ice Arctic front increases to a peak in September and the River Plums front peaks in August. In other months, the seasonal dynamics is expressed in the meandering of the position of the Marginal Ice Arctic front and the River Plums front. It is revealed that in 2007 and 2011, with a minimum ice cover, the average temperature gradient inside the River Plums frontal zone was $0.029\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, with a width of about 137 km, and in the Marginal Ice Arctic front — $0.027\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ with a width of almost 104 km.

Keywords: sea surface temperature, temperature gradient, the River Plums and the Marginal Ice Arctic frontal zones, frontal sections, Kara Sea.

Фронтальные зоны на поверхности вод являются важнейшей частью общих процессов взаимодействия океана и атмосферы [1]. Динамика фронтов в Арктическом регионе является определяющей в формировании и дальнейшей изменчивости процессов в атмосфере и гидросфере в целом.

В условиях последних десятилетий прослеживается значительная климатическая изменчивость в Арктике, проявляющаяся в интенсивном освобождении региона ото льда [2]. Данные климатические изменения спровоцировали масштабное изучение данного региона, в результате которого было получено множество новых данных [3—5], не имеющих при этом должного анализа и обобщения. В частности изменчивость поверхностных фронтальных зон на акватории Карского моря в условиях сокращения ледового покрова до настоящего времени не рассматривалась.

В Карском море выделяют несколько фронтальных зон, имеющих сезонный характер: в районе пролива Карские ворота (за счет перемешивания баренцевоморских и карских вод) [6], фронтальная зона Ямальского течения (за счет перемешивания карских и прибрежных вод) [3], множество маркирующихся по различным гидрологическим характеристикам поверхностных фронтальных зон, связанных с влиянием вод поступающих из Оби и Енисея [7, 8]. Многообразие выделенных фронтов формирует две обширные фронтальные зоны, которые рассматриваются в данной работе, так как наиболее интересны с точки зрения их генезиса. Первая зона, которую далее будем называть Прикромочная, находится в северной части моря, а вторая зона, которую будем называть Стоковая, располагается 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 [9]. В формирование данной фронтальной зоны вносит вклад течение Персея и течение Святой Анны [10]. Однако о данной фронтальной зоне имеются лишь отрывочные сведения [11], не дающие полную и систематическую картину его изменчивости.

Стоковая фронтальная зона также прослеживается только в теплый период года, так как всецело зависит от речного стока Оби и Енисея [12]. Причины формирования данной фронтальной зоны приводятся в разных источниках [7, 13, 14]. В работе [13] 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 соленым градиентам [7, 14, 15] или распространению хлорофилла-а [16]. В работах [13, 17] Стоковый фронт фиксируется с помощью прямых измерений температуры поверхности вод. Однако обобщенных сведений о изменчивости положений и количественных характеристиках Стоковой фронтальной зоны в современных климатических условиях нет.

Стоит также обратить внимание на то, что в Карском море за период 2005—2012 гг. имело место высокое теплосодержание вод и малая ледовитость. При этом самым малоледовитым в этот период оказался сезон 2011—2012 гг. [18]. Это позволяет шире использовать систематически поступающие данные дистанционного зондирования, включающие сведения о ТПМ. Современные методы спутникового зондирования совместно с контактными данными позволяют проводить ассимиляцию, которая формирует регулярную сетку ТПМ в регионе исследования. Особый интерес представляет изучение обеих фронтальных зон в годы с интенсивным сокращением ледового покрова Арктики, к которым относятся 2007 и 2011 гг. [2]. В результате уникальные условия последнего десятилетия дают возможность исследования изменчивости положения Прикромочной и Стоковой фронтальной зоны в условиях уменьшения площади льда.

Цель данной работы — определение характеристик сезонных Прикромочной и Стоковой фронтальных зон и оценка положения и динамики основных фронтов внутри них по данным ТПМ в теплый период 2007 и 2011 гг.

Материалы и методы. Для анализа изменчивости фронтальных зон и фронтов были выбраны данные с июля по сентябрь 2007 и 2011 гг. по температуре поверхности Карского моря, которые объединяют прямые и спутниковые измерения в океане. Исходные данные — среднесуточные поля ТПМ GHR SST OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis с сайта <http://apdrc.soest.hawaii.edu/> [5] с пространственным разрешением 0.05° .

Используя методику, представленную в работе [19], по полученным данным производился расчет среднемесячных и декадных полей температур, на основе которого вычислялись поля градиентов. Так как климатический градиент температуры поверхности в Карском море не известен, то для выделения фронтальных зон будет использоваться полученное в результате осреднения значений градиента каждой точки поля (i, j) за два года среднесезонное значение градиента — $0.01^\circ\text{C}/\text{км}$. Однако применение критерия десятикратного превышения градиента температуры во фронтальной зоне над фоновым [1] для выделения фронтальных зон на акватории моря не представляется возможным, так как в таком случае поле градиентов будет однородным. Поэтому для идентификации положения фронтальных зон согласно [9, 19] использовалось двойное превышение градиента над фоновым. Даже при использовании данного критерия среднесезонного градиента, фронтальные зоны на поверхности распадаются на отдельные пятна и не всегда четко идентифицируются на поверхности.

Поэтому для выделения положения фронтальной зоны на акватории всего Карского моря строились композитные карты (рис. 1, *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 [20]. Для уточнения положения основного фронта внутри фронтальной зоны и оценки количественных характеристик фронтальных разделов проводились три меридиональных разреза (на рис. 1, *а* — три черных линии) по $65^\circ, 75^\circ, 85^\circ$ в.д. Количественные оценки выполнялись для декадных полей градиентов температуры, которые далее усреднялись на среднемесячном и сезонном интервалах. Пример разреза градиента ТПМ вдоль 65° в.д., представлен на рис. 1, *б*. Два выделенных пика, основанные на критерии двойного превышения, соответствуют Стоковой и Прикромочной фронтальным зонам. Наивысшее значение этих пиков — максимальный градиент, который является положением основного фронтального раздела во фронтальной зоне, на данном разрезе. По данным трех разрезов по декадам определялись [1]: средняя ширина фронтальной зоны и максимальный градиент ТПМ в ней.

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.

Изменчивость положения фронтальных разделов в теплый сезон. Результаты выделения среднемесячных положений основных фронтов внутри поверхностных Прикромочной и Стоковой фронтальных зон за теплый сезон 2007 и 2011 гг. представлены на рис. 2, дающие представление о внутрисезонной изменчивости фронтов. Так как фронтальная зона имеет значительное число фронтальных разделов, на картах для удобства отмечается основной фронт внутри фронтальной зоны. Далее для краткости будут называться в работе Прикромочный и Стоковый фронт.

Сравнивая динамику изменчивости положений Прикромочного фронта в оба года, представленную на рис. 2, *а—б*, можно сказать, что в целом фронт интенсивнее смещается на север Карского моря в 2007 г., нежели в 2011. В 2007 г. основной фронт Прикромочной фронтальной зоны динамично перемещается по всей северной части Карского моря, а в 2011 г. 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 г. В 2011 г. кромка льда подвержена меньшей пространственной изменчивости, и, как следствие, Прикромочный фронт не имеет значительной динамики [21]. Общая тенденция смещения фронта на север наблюдается в

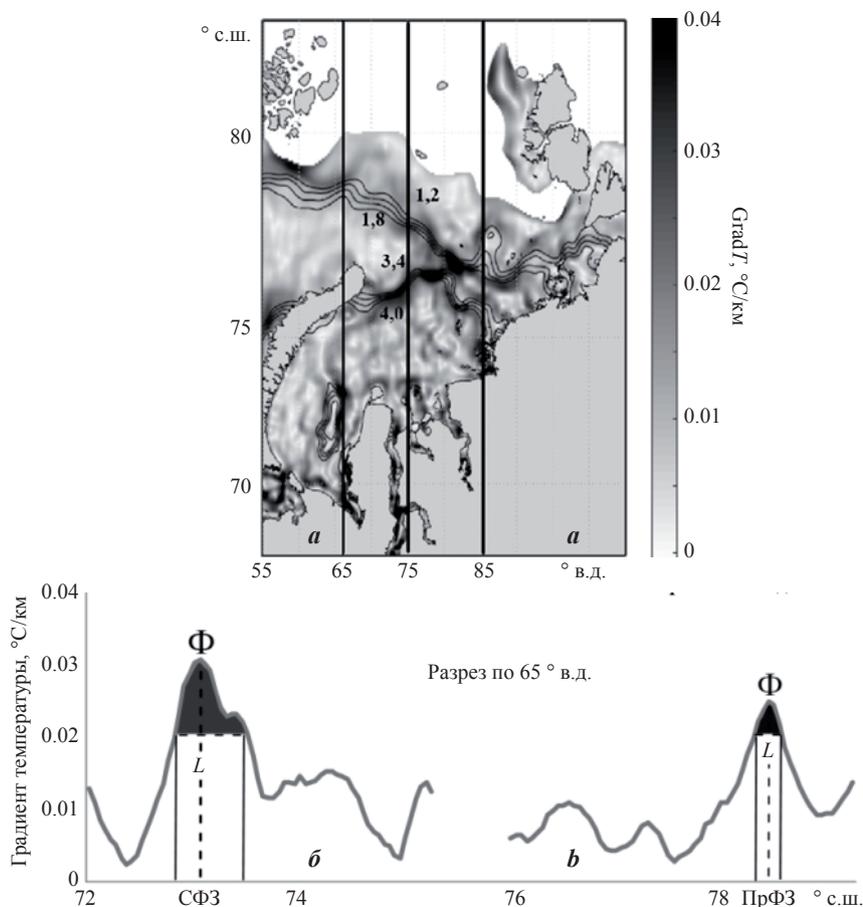


Рис. 1. Методика выделения положения фронтальной зоны и фронтальных разделов. *a* — композитная карта градиентов и изолиний температур поверхности моря по среднемесячным данным за июль 2007 г. (жирные вертикальные линии — меридиональные разрезы, на которых определялись характеристики фронтальных зон), *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, *F* — положение фронта на разрезе).

Fig. 1. Methods of allocating the position of the frontal zone and frontal sections.

a — composite map of gradients and isolines of sea-surface temperatures according to monthly average data for July 2007 (thick vertical lines — meridional sections, on which characteristics of frontal zones were determined), *b* — temperature gradient section along 65° E. with an example of highlighting the position of the fronts and the width of the frontal zones (CFZ — the River Plums frontal zone, PrFZ — the Marginal Ice Arctic frontal zone, *L* — width of the frontal zone, *F* — the position of the front in the section).

оба года. Отмечается также схожесть положения фронта в районе о. Визе в августе 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 [22].

В источнике [13] 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 гг. по [13] Стоковая фронтальная зона имеет характер распределения соответствующий западному типу речных вод. В работе [16] с помощью контактных наблюдений в сентябре и в источнике [14] в июле 2011 г. подтверждаются положения выделенного Стокового фронта. Область изменчивости фронта в 2007 г. 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 г., которая связана с выхолаживанием поверхности вод [23]. 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. 3, *a*—*г*) среднедекадных положений Стокового и Прикромочного фронтов за июль и август 2007 и 2011 гг.

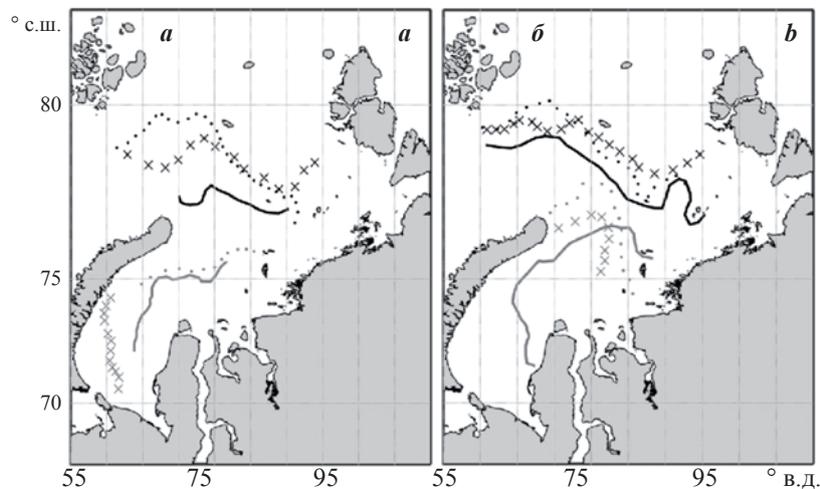


Рис. 2. Среднемесячные карты положений Прикромочного (чёрная линия — июль; чёрные точки — август; чёрные кресты — сентябрь) и Стокового фронтов (серая линия — июль; серые точки — август; серые кресты — сентябрь) за 2007 (а) и 2011 (б) гг.

Fig. 2. Average monthly maps of the Marginal Ice Arctic position (black line — July; black dots — August; black crosses — September) and the River Plums position of fronts (grey line — July; grey point — August; grey crosses — September) for 2007 (a) and 2011 (b).

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 [22] 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 Стокового 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 г. фронт смещается на 100—150 км к северной части архипелага Новая Земля. Максимальная изменчивость положения фронта за декаду отмечается в августе 2007 г., когда наблюдалось его смещение на 100 км к югу, что может быть связано с ветровым воздействием. Внутрисезонная изменчивость фронта за 2011 г., незначительна и составляет не более 100 км к северу.

В целом декадные положения Стокового фронта отражают тип западного [13] распределения речных вод в течение всего летнего сезона в оба года. Среднемесячные положения Стокового фронта близки к среднедекадным только в 2011 г.

Оценка количественных характеристик Прикромочной и Стоковой фронтальных зон.

Количественные характеристики Прикромочной и Стоковой фронтальных зон представлены в табл. 1. Средняя ширина фронтальной зоны рассчитывалась путём осреднения данных, полученных на трех меридиональных разрезах ТПМ. Из этих же данных производился выбор оценки максимального градиента ТПМ во фронтальной зоне, и детектировалось положение фронта на каждом разрезе.

Из табл. 1 видно, что за теплый сезон 2007 и 2011 гг. значения градиента ТПМ во фронтальных зонах отличаются незначительной изменчивостью.

Максимальная средняя ширина Стоковой фронтальной зоны за отмеченные годы составляет 172 км, а максимальный градиент 0.035 °C/км. Наибольшая изменчивость ширины фронтальной зоны отмечается в 2011 г. 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

Количественные характеристики со среднедекадной изменчивостью Стоковой и Прикромочной фронтальных зон в 2007 и 2011 гг.

A decade variability of quantitative characteristics of the River Plums and the Marginal Ice Arctic frontal zones in 2007 and 2011

Месяц	№ декады	Фронт							
		Стоковый				Прикромочный			
		Средняя ширина, км		Максимальный градиент, °С/км		Средняя ширина, км		Максимальный градиент, °С/км	
		2007	2011	2007	2011	2007	2011	2007	2011
7	1	124	120	0.029	0.035	109	107	0.025	0.027
	2	136	129	0.034	0.028	114	98	0.026	0.024
	3	139	103	0.029	0.03	121	90	0.021	0.031
8	1	148	114	0.027	0.029	108	94	0.021	0.033
	2	162	149	0.028	0.027	128	84	0.029	0.028
	3	172	158	0.031	0.025	117	97	0.032	0.021
9	1	163	144	0.024	0.031	91	111	0.033	0.022
	2	—	127	—	0.027	—	96	—	0.035
	3	134	100	0.029	0.034	106	103	0.021	0.032
Сред. за год		147	127	0.028	0.029	111	97	0.026	0.028

вод. Максимальные градиенты ТПМ в сентябре связаны с интенсивным выхолаживанием морских вод и сохранением последующим образованием холодного квазиоднородного слоя на акватории моря.

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.

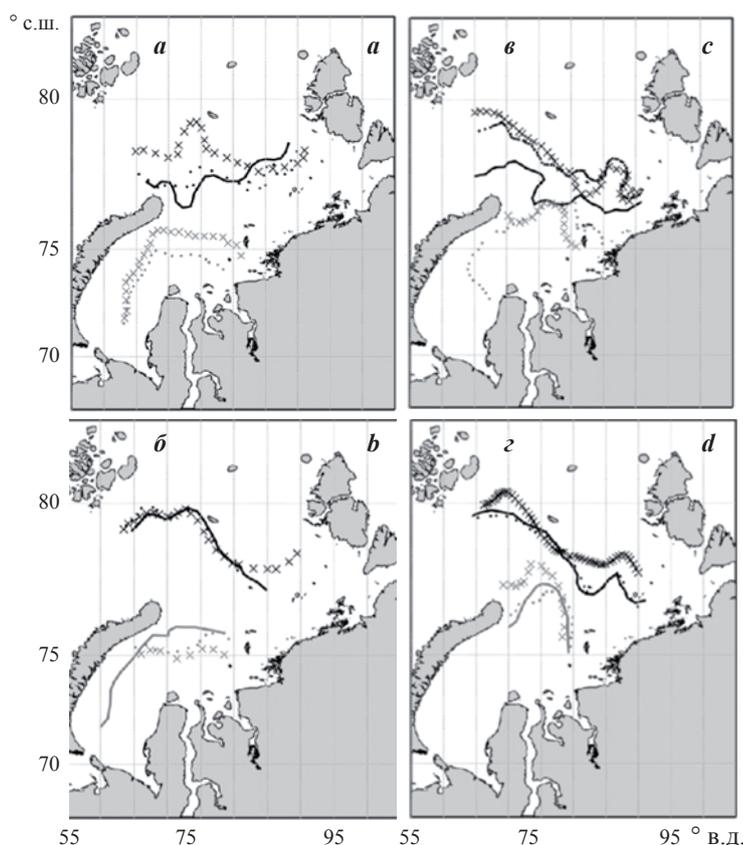


Рис. 3. Карты среднедекадных положений Прикромочного и Стокового фронтов на акватории Карского моря.

(сплошная линия — 1 декада; точка — 2 декада; крест — 3 декада); а — за июль 2007 г., б — за август 2007 г., в — за июль 2011 г., г — за август 2011 г.

Fig. 3. Maps of the middle-decade positions of the Marginal Ice Arctic and the River Plums fronts in the waters of the Kara Sea.

(solid line — 1 decade; point — 2 decades; cross — 3 decades); a — in July 2007, b — in August 2007, c — in July 2011, d — August 2011.

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.

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.

Представленные материалы свидетельствуют о наличии сложной внутримесячной динамики фронтальных зон в Карском 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.

В ходе работы предпринята попытка систематического описания особенностей внутримесячной и внутрисезонной динамики Стоковой и Прикромочной фронтальных зон Карского моря и их основных фронтов в годы с минимальной площадью ледового покрова. Проблема в описании фронтальной изменчивости на акватории моря заключалась в недостаточном обобщении полученных ранее как экспедиционных, так и спутниковых данных. Предложенный в работе методический подход позволил описать изменчивость и произвести количественные оценки, как фронтальных зон, так и фронтов внутри них в аномальных ледовых условиях современного меняющегося климата.

В результате работы получены внутрисезонные осредненные оценки характеристик фронтальных зон в теплый период года. Средний градиент температуры при декадном осреднении данных внутри Стоковой фронтальной зоны составляет $0.029\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, при ширине около 137 км. В Прикромочной фронтальной зоне — $0.027\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ 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 Стокового фронтов отмечается пик внутрисезонной изменчивости положения, очевидно связанный с процессами синоптического характера, таянием арктического льда и ветровой динамикой.

Дальнейшее развитие исследований предполагается направить на поиск вероятной когерентности между количественными оценками внутримесячной и внутрисезонной изменчивости характеристик фронтальных зон и проявлениями субмезомасштабной вихревой динамики.

Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме №0149-2018-0014 «Волновые процессы, явления переноса и биогеохимические циклы в морях и океанах: исследование формирующих механизмов на основе физико-математического моделирования и натурных экспериментальных работ».

Литература

1. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 296 с.
2. Платонов Н. Г., Мордвицев 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—25.
3. Флинт М. В., Поярко 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.
4. Зацепин А. Г., Морозов Е. Г., Пака В. Т., Демидов А. Н., Кондрашов А. А., Корж А. О., Кременецкий В. В., Поярко 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.

5. GHRSSST. Overview. Information about group and working model [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ghrsst.org> (дата обращения: 20.04.2016).
6. 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.
7. Зацепин А. Г., Завьялов П. О., Баранов В. И., Кременецкий В. В., Недоспасов А. А., Пояров С. Г., Очеретник В. В. О ветровом механизме трансформации линзы опресненных речным стоком вод в Карское море // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 1. С. 5—12.
8. Щука С. А., Кременецкий В. В., Недоспасов А. А., Очеретник 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.
9. 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.
10. Кулаков М. Ю. О новом подходе к моделированию циркуляции вод Арктических морей // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2012. № 2. С. 55—62.
11. 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.
12. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. *Моря СССР. Карское море*. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
13. Полухин А. А. Формирование гидрохимической структуры вод Карского моря под влиянием континентального стока. Дис. ... канд. Географических наук: 25.00.28. М., 2017. 149 с.
14. Гольдин Ю. А., Глуховец Д. И., Гончаренко И. В., Шатрапин 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.
15. 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.
16. Мошаров С. А. Распределение первичной продукции и хлорофилла «а» в Карском море в сентябре 2007 г. // *Океанология*. 2010. Т. 50, № 6. С. 933—941.
17. Буренков В. И., Гольдин Ю. А., Артемьев В. А., Шеберстов С. В. Оптические характеристики вод Карского моря по судовым и спутниковым наблюдениям // *Океанология*. 2010. Т. 50, № 5. С. 716—729.
18. Жичкин А. П. Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2015. № 1. С. 55—64.
19. Ожигин В. К., Ившин В. А., Трофимов А. Г., Карсаков А. Л., Аницферов М. Ю. *Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость*. Мурманск: ПИПРО, 2016. 216 с.
20. Давидович В. А. Алгоритм автоматического распознавания температурных океанических фронтов // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 1. С. 105—112.
21. Букатов А. Е., Букатов А. А. Изменчивость положения кромки морского льда в Арктике // *Материалы научной конференции «Прикладные задачи математики»*. Севастополь. 2017. С. 59—65.
22. 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.
23. 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.