

УДК 551.465.62

© А. А. Коник^{1,2*}, А. В. Зимин^{1,2}, О. А. Атаджанова^{1,3}, 2022

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Россия, Москва, Нахимовский проспект, 36.

²Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Университетская наб., 7–9, г. Санкт-Петербург, Россия

³Морской гидрофизический институт РАН, 299011, ул. Капитанская, д. 2, г. Севастополь, Россия

*konikrshu@gmail.com

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКОВОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ В КАРСКОМ МОРЕ В ПЕРВЫЕ ДВА ДЕСЯТИЛЕТИЯ XXI ВЕКА

Статья поступила в редакцию 02.06.2022, после доработки 05.11.2022, принята в печать 11.11.2022

Аннотация

Статья посвящена получению многолетних физико-географических характеристик Стоковой фронтальной зоны как отдельной гидрологической структуры, формирующейся на границе поверхностного опресненного слоя рек Оби и Енисея и морских вод в Карском море. В качестве исходных данных для выделения фронтальной зоны в работе выступают спутниковые измерения поверхностной температуры (MODIS Aqua, Suomi NPP-VIIRS), поверхностной солености (NASA SMAP) и уровня моря (AVISO) за период с июля по октябрь с 2002 по 2020 гг. Положение и характеристики Стоковой фронтальной зоны определялись с помощью кластерного анализа, который впервые был применен к обобщенному набору данных дистанционного спутникового зондирования в этом регионе. Установлено, что в теплый период года средний многолетний температурный поверхностный градиент Стоковой фронтальной зоны составляет 0,08 °С/км, градиент поверхностной солености 0,1 PSU/км, а площадь — 155 тыс. км². Выявлено, что за безледный период второго десятилетия XXI века градиент температуры фронтальной зоны ослабевает на 0,04 °С/км, а площадь уменьшается на 100 тыс. км². Показано, что температурный и соленостный градиенты, а также площадь Стоковой фронтальной зоны определяются объемами речного стока Оби и Енисея и параметрами льдов в теплый период года. Получены оценки связи характеристик фронтальной зоны с объемами речного стока, параметрами ледяного покрова и ветра, а также величиной атмосферных индексов Скандинавского колебания.

Ключевые слова: фронтальная зона, речной плюм, морской лед, Скандинавское колебание, Карское море

© А. А. Коник^{1,2*}, А. В. Зимин^{1,2}, О. А. Атаджанова^{1,3}, 2022

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

²St. Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034, Russia

³Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 2 Kapitanskaya Str., Sevastopol, 299011, Russia

*konikrshu@gmail.com

SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF THE CHARACTERISTICS OF THE RIVER PLUME FRONTAL ZONE IN THE KARA SEA IN THE FIRST TWO DECADES OF THE XXI CENTURY

Received 02.06.2022, Revised 05.11.2022, Accepted 11.11.2022

Abstract

The article is devoted to obtaining long-term physical and geographical characteristics of the River Plume frontal zone as a separate hydrological structure that forms at the boundary of the fresh surface layer of the Ob and Yenisei Rivers. The primary data for identifying the frontal zone are satellite measurements of surface temperature (MODIS Aqua, Suomi NPP-VIIRS), surface salinity (NASA SMAP) and sea level (AVISO) for the period from July to October from 2002 to 2020. The position and characteristics of the River Plume frontal zone were determined using cluster analysis, which was applied for the first time to an

Ссылка для цитирования: Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А. Пространственно-временная изменчивость характеристик стоковой фронтальной зоны в Карском море в первые два десятилетия XXI века // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 4. С. 23–41. doi:10.48612/fpg/38mu-zda7-dpep

For citation: Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A. Spatial and Temporal Variability of the Characteristics of the River Plume Frontal Zone in the Kara Sea in the First Two Decades of the XXI Century. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 23–41. doi:10.48612/fpg/38mu-zda7-dpep

integrated set of remote satellite sensing data in this region. The results of the study showed that in the warm period of the year, the average long-term surface temperature gradient of the River Plume frontal zone was 0.08 °C/km, the surface salinity gradient was 0.1 PSU/km, and the area was 155,000 km². During the ice-free period of the second decade of the 21st century, the temperature gradient of the frontal zone weakens by 0.04 °C/km, and the area decreases by 100,000 km². The correlation analysis showed that the temperature and salinity gradients, as well as the area of the River Plume frontal zone, were determined by the volumes of the river discharge of the Ob and Yenisei and ice parameters in the warm period of the year. The article presents the obtained estimates of the relationship between the characteristics of the frontal zone and the volume of river discharge, ice cover and wind parameters, as well as the value of the atmospheric indices of the Scandinavian oscillation (SCAND).

Keywords: frontal zone, river plume, sea ice, SCAND, Kara Sea

1. Введение

Карское море является одним из окраинных морей Северного Ледовитого океана. Оно ограничивается с запада арх. Новая Земля, с юга Сибирским побережьем и с востока морем Лаптевых (рис. 1). Важным фактором формирования водных масс в Карском море является материковый сток крупных сибирских рек, общий объем которого составляет 1350 км³/год [1, 2]. Наибольший вклад в формирование значительного по площади речного плюма вносят крупные реки Обь (430 км³/год) и Енисей (650 км³/год).

В Карском море в поверхностном слое выделяются четыре основных водных массы (типа вод). На западе моря наблюдаются баренцевоморские воды [3–5]. В северной части Карского моря располагается арктическая водная масса [6]. На юге и востоке моря наблюдаются карские воды [1–2, 7], а вблизи мест впадения крупных рек (Обь, Енисей и др.) — речные воды [1, 8–9]. Речные воды, распространяясь по акватории, образуют значительный по площади поверхностный опресненный слой (ПОС) (рис. 1) средней толщиной около 10 м, который оказывает существенное влияние на многие физические и биологические процессы в Карском море [7–11]. Область ПОС может достигать площади 200–250 тыс. км² [7, 12]. В зависимости от конфигурации ПОС на поверхности моря выделяют «западный», «центральный» и «восточный» типы [1, 10] его распространения. Воды в области ПОС относительно теплые и изменяются от 4–5 °C в сентябре

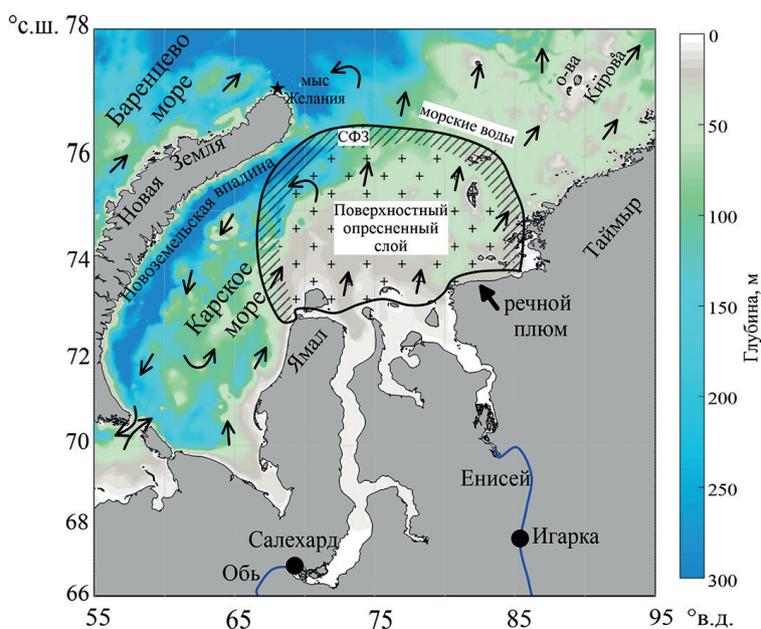


Рис. 1. Географические объекты и схема формирования Стоковой фронтальной зоны (СФЗ): черными точками показаны гидрографические посты на реках Обь (Салехард) и Енисей (Игарка), а черными стрелками — схема средних течений [1] в Карском море

Fig. 1. Geographical objects and the scheme of formation of the river plume frontal zone (RPFZ) in the Kara Sea: black dots show hydrographic posts on the Ob (Salekhard) and Yenisei (Igarka) Rivers, and black arrows show the scheme of middle currents [1] in the Kara Sea

до 10 °С в июле [1, 3, 7]. В результате перемешивания морских и речных вод в данной области фиксируются значительные колебания солености, которые могут составлять от 8 до 17 PSU за период с июня по сентябрь [7]. Необходимо отметить, что такие пространственные колебания отражаются не только на гидрофизических характеристиках вод, но и на гидрохимических и биологических процессах моря [11, 13].

Пограничная область между водами морского и речного генезиса характеризуется значительной неустойчивостью [8–9]. Взаимодействие ПОС и морских вод приводит к формированию барьера или фронтального раздела, где значительно ослабевает вертикальное перемешивание. Согласно классификации, представленной в [14], эту границу можно назвать Стоковой фронтальной зоной (СФЗ). СФЗ — это зона между речными и морскими водами, характеризующаяся резкими соленостными и температурными градиентами. В отдельных исследованиях [11, 14, 15] получены количественные оценки положений и характеристик СФЗ в отдельные годы. В настоящее время для определения положения фронтальных зон в Карском море чаще всего используются нерегулярные судовые измерения солености [7–9]. В большинстве таких исследований рассматривается вся область ПОС, а СФЗ, являющаяся её внешней границей, остается не исследованной. Таким образом, в настоящее время отсутствуют представления о физико-географических характеристиках СФЗ и их изменчивости, что в условиях меняющегося климата актуализирует её исследование.

Представляется, что для идентификации СФЗ на регулярной основе можно использовать постоянно поступающие данные спутниковых измерений солености в комплексе с температурой и уровнем, как это выполнено в работе [16]. Однако в настоящее время считается, что погрешности определения характеристик поверхностной солености в холодных и распресненных водах Карского моря по спутниковым измерениям весьма велики [17]. При этом для анализа крупномасштабной изменчивости полей солености отдельных гидрографических станций, которые представлены в большинстве исследований [7–9], недостаточно. Поэтому использование спутниковых данных для выделения обширной фронтальной зоны требует проведения их валидации по материалам крупномасштабных океанографических измерений. Результаты подобной валидации приведены в работе [12], где показана возможность использования спутниковых измерений для определения физико-географических характеристик фронтальных зон в морях Арктики.

Согласно исследованиям [11, 18–19], на формирование ПОС влияет множество региональных факторов: объем речного стока, направление и устойчивость приводного ветра, характеристики ледовых условий на акватории. Как отмечалось в [2, 20], глобальная атмосферная циркуляция над Карским морем вносит значительный вклад в формирование и изменчивость его гидрофизических характеристик. Соответственно, пространственная динамика и характеристики СФЗ формируются под влиянием региональных и глобальных процессов взаимодействия океана и атмосферы. Однако до настоящего времени отдельное комплексное описание многолетней изменчивости параметров СФЗ в Карском море и влияющих на неё факторов проведено не было.

Отсутствие сведений о СФЗ, даже при наличии постоянно поступающих спутниковых данных, связано с проблемой выбора методического инструмента для исследования фронтальных зон в высокоширотном регионе [2, 4, 9]. Согласно концепции, представленной в работе [14], фронтальная зона является областью, где горизонтальный градиент характеристики значительно (на порядок) превышает его фоновое распределение. В морях арктического региона на поверхности, как правило, отсутствуют значительные градиенты [21, 22]. По этой причине возникают сложности с определением пространственной динамики и характеристик фронтальных зон. Анализ гидрологических полей нескольких характеристик увеличит точность определения положения фронтальной зоны. Одним из подходов, позволяющим выполнить выделение районов с большой величиной градиентов разных характеристик, является применение кластерного анализа.

Таким образом, цель данного исследования заключается в изучении пространственно-временной изменчивости характеристик СФЗ в Карском море за период с 2002 по 2020 гг. и анализе степени ее связи с процессами и явлениями разного масштаба.

2. Данные

Для определения динамики и параметров СФЗ были использованы среднемесячные спутниковые измерения температуры, солености и уровня моря с июля по октябрь с 2002 по 2020 гг. (табл. 1).

Для идентификации термических характеристик СФЗ были использованы данные температуры поверхности моря (ТПМ) инфракрасных радиометров высокого разрешения MODIS Aqua и Suomi NPP VIIRS с пространственным шагом 0,05° [23]. Использование радиометрических данных NASA SMAP с пространственным разрешением 1/4° позволило определить характеристики солености поверхности моря (СПМ) СФЗ [24]. Колебания уровня в СФЗ анализировались с помощью данных абсолютной динамической топографии (АДТ) набора данных AVISO с пространственным шагом 1/4° [25].

Таблица 1

Table 1

Типы и параметры данных, используемых в исследовании

Types and parameters of data

| Сенсор/Набор данных | Тип данных | Время | Уровень |
|---------------------|-------------|-----------------|---------|
| MODIS | ТПМ | 07.2002–10.2011 | L3 |
| NPP VIIRS | | 07.2012–10.2020 | L3 |
| SMAP | СПМ | 07.2015–10.2020 | L3 |
| Aviso | АДТ | 07.2002–10.2020 | L4 |
| Arctic rivers | Речной сток | 05.2002–10.2020 | – |
| CMEMS | Ветер | 07.2002–10.2020 | L4 |
| AMSR-E | Лед | 07.2002–10.2011 | L3 |
| AMSR-2 | | 07.2012–10.2020 | L3 |

Для анализа влияния региональных процессов на динамику и параметры СФЗ использовались сведения о речном стоке, полученные в наиболее близких к Карскому морю гидропостях на Оби в Салехарде и Енисее в Игарке (рис. 1). Кроме этого, привлекались 6-часовые данные о скорости надводного ветра (восточная и северная компоненты) с пространственным разрешением $1/4^\circ$ набора данных SIW-IFREMER-BREST-FR, полученные от Copernicus Marine Environmental Monitoring Service¹. Ледовые условия (площадь и сплоченность в исследуемом районе) описывались с помощью данных радиометров AMSR-E и AMSR-2, подготовленных Бременским университетом [26].

Анализ влияния глобальных атмосферных переносов над Северной Евразией на изменение параметров СФЗ в Карском море проводился с помощью индексов атмосферной циркуляции, полученных с сайта Climate Prediction Centre². В исследовании были использованы индексы Скандинавского (СК) и Полярного (ПК) колебаний [27]. Индекс СК показывает изменение атмосферного давления над Скандинавией и при положительных значениях характеризуется усилением блокировки зональных переносов воздушных масс, а при отрицательных — их ослаблением над полуостровом [28]. Индекс ПК описывает изменчивость атмосферного давления между Арктикой и Евразией [28–29]. Положительные значения индекса характеризуют увеличение интенсивности циклонической активности в Арктике и усиление меридиональных переносов, а отрицательные — ослабление циклонов и переносов.

3. Методы

3.1. Определение вод СФЗ на поверхности Карского моря

В начале метода определения пространственного положения и количественных оценок фронтальных зон выполнялась загрузка данных ТПМ, СПМ и АДТ. Если данные по полю отсутствовали или количество пропусков, например, из-за большого количества льда на поверхности или облачного покрова, превышало 20 %, то далее они не использовались.

Основным критерием для определения фронтальной зоны является повышенный градиент характеристик гидрологических полей, величина которого в два раза выше фонового градиента Карского моря [21–22]. Поэтому далее, согласно представленному методу в [22], производился расчет горизонтальных градиентов температуры и солености.

Затем в программном обеспечении MATLAB с помощью функции «griddata» создавалась регулярная двумерная область. Координаты границ сетки соответствовали центральной части Карского моря: $69\text{--}78^\circ\text{с. ш.}$ и $55\text{--}95^\circ\text{в.д.}$ Шаг узлов сетки составил $1/4^\circ$. На построенную сетку производилась линейная интерполяция спутниковых данных ТПМ, СПМ, их градиентов и АДТ. Полученный массив данных использовался для идентификации поверхностных водных масс Карского моря методом кластерного анализа с помощью программного пакета Statistica 10.0. Главной задачей анализа являлось разбиение данных на однородные устойчивые во времени и по местоположению группы.

Перед началом расчета кластеров производилась стандартизация всех данных в объединенной матрице: выполнялось деление каждой характеристики (ТПМ, СПМ, АДТ и их градиентов) на её максимальное

¹CMEMS, <https://doi.org/10.48670/moi-00185> (дата обращения: 10.01.2022)

²Climate Prediction Centre, <https://www.cpc.ncep.noaa.gov> (дата обращения: 10.04.2022)

значение. На первом этапе для разведочного анализа использовался иерархический алгоритм кластеризации на основе метода Уорда с Евклидовой метрикой. С помощью полученных дендрограмм за разные месяцы и годы производилась предварительная оценка оптимального количества классов и подклассов, которые могут соответствовать различным типам вод. Количество классов, полученное с помощью метода Уорда, использовалось в качестве априорных ограничений для окончательного разбиения данных с помощью интерактивного метода k-means.

По результатам кластерного анализа строились ежемесячные карты распределения выделенных положений классов с акцентом на СФЗ. Полученные карты положений основных классов вод анализировались за каждый отдельный месяц. Для класса, соответствующего СФЗ, на месячном и годовом интервалах рассчитывались средние значения характеристик зоны: ТПМ, СПМ, их градиенты, АДТ и площадь.

3.2. Методы анализа влияния региональных и глобальных процессов на характеристики СФЗ

Для определения степени связи региональных и глобальных процессов с характеристиками СФЗ использовался кросскорреляционный анализ.

Сопоставление характеристик фронтальной зоны с данными о речном стоке, ветре, площади и сплошности ледяного покрова выполнялось на месячном интервале со сдвигом до 12 месяцев. Для данных индексов атмосферной циркуляции проводился корреляционный анализ со средними сезонными оценками характеристик фронтальной зоны на временном интервале со сдвигом от 0 до 3 сезонов. Полученные коэффициенты проходили проверку с помощью критерия Стьюдента. В работе описываются только коэффициенты, значимые на 95 %-м уровне.

4. Результаты и обсуждение

4.1. Результаты кластерного анализа

В качестве примера для определения и получения характеристик СФЗ использовались подготовленные данные за август 2019 г. Результаты кластеризации алгоритмом Уорда представлены на рис. 2, а. На дендрограмме четко выделялись два основных класса, что предполагает наличие существенных различий между характеристиками вод. Данные классы могут быть интерпретированы как морские и солоноватые воды. При уменьшении порогового расстояния в среднем в три раза, каждый из классов может быть разделен на два подкласса. Класс, идентифицированный как морские воды, разделялся на подклассы более четко,

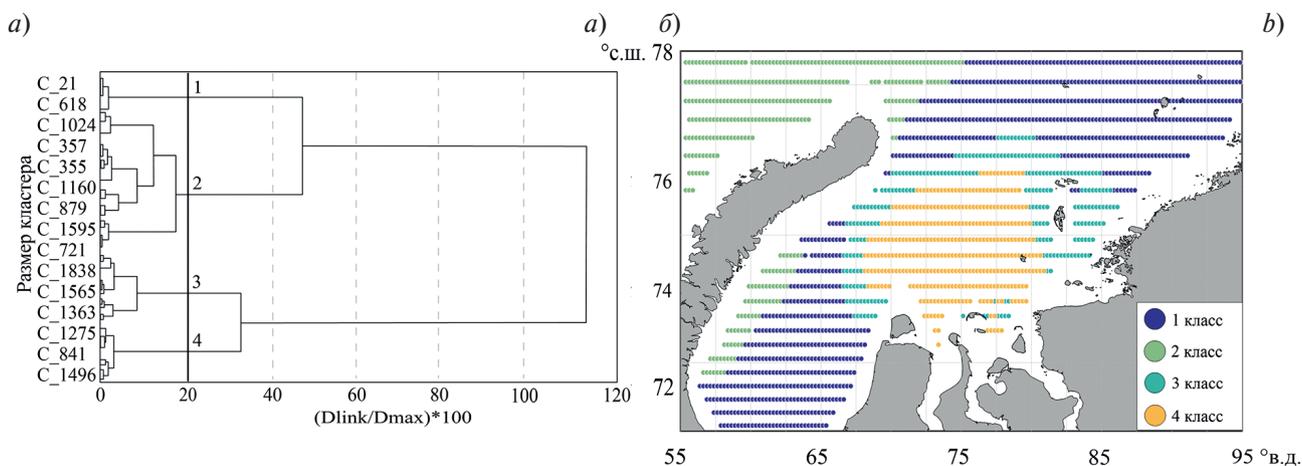


Рис. 2. Результаты кластерного анализа по спутниковым данным в августе 2019 г. в Карском море: а — дендрограмма, полученная методом Уорда. Черными вертикальными линиями и цифрами обозначены основные классы вод; б — классификация, полученная методом k-средних: 1 класс (синий) — карская водная масса, 2 класс (зеленый) — баренцевоморская водная масса, 3 класс (бирюзовый) — внешняя граница ПОС — СФЗ, 4 класс (оранжевый) — внутренняя часть ПОС

Fig. 2. The results of cluster analysis based on satellite data in August 2019 in Kara Sea: a — dendrogram obtained by Ward's method. Black vertical lines and numbers indicate the main classes of waters; b — is the classification obtained by the k-means method: class 1 (blue) — is the Kara waters, class 2 (green) — Barents waters, class 3 (turquoise) — is the outer boundary of the FSL — RPFZ, class 4 (orange) — is the inner part of the FSL

чем солоноватые. Из физических соображений известно [1, 2, 8, 11], что морские воды в данном районе разделяются на баренцевоморские и карские воды. Речные же воды, как правило, представляются единым классом [7], что вполне логично, если задать единый с морскими водами формальный уровень разделения на классы (рис. 2, а). Однако на представленной дендрограмме видно, что у класса речных вод также наблюдалось четкое разделение два подкласса, которые далее будут называться воды внутренней части ПОС и воды СФЗ. Отметим, что в исследованиях [7, 9] часто отмечалось наличие фронтальных разделов в области ПОС, характеристики вод в которых отличаются от основной массы вод опреснённой линзы. Соответственно, результаты кластерного анализа методом Уорда позволяют сделать вывод о том, что в речных водах так же, как и в морских, присутствует четкое разделение на воды с различными характеристиками. В результате, в данном регионе наиболее оптимально с физической и статистической точки зрения будет выделение четырех классов вод. Дальнейшее подробное деление на классы не целесообразно.

Полученное количество классов использовалось при кластеризации методом k-means, результаты которого изображены на рис. 2, б. Количественные оценки полученной кластеризации представлены в табл. 2. Из данной таблицы видно, что проведенная классификация позволяет достаточно четко соотнести полученные классы с водами разного генезиса, которые наблюдаются в Карском море.

Согласно [1–3, 5–6], карские воды располагаются вблизи полуострова Ямал и арх. Новая Земля на западе, а также на севере и востоке Карского моря недалеко от полуострова Таймыр. Пространственное положение 1 класса (рис. 2, б) полностью совпадает с описанием климатического положения данной водной массы, средняя температура которой составляет 6–8 °С, а соленость — 24–28 PSU [1, 2, 7]. Необходимо учитывать, что карские воды постоянно взаимодействуют с другими типами вод, что сказывается на её гидрологических характеристиках [1, 3]. В связи с этим, между полученными и климатическими термохалинными оценками могут присутствовать различия, особенно в характеристиках солености. Однако оценки поверхностных значений температуры и солености близки к индексам, соответствующим Карской водной массе.

Баренцевоморские воды попадают в Карское море с запада, севернее мыса Желания, и южным путем через Новоземельские проливы распространяются на восток [3–5]. Климатическое описание положения частично схоже с расположением второго класса (рис. 2, б). Данная водная масса характеризуется относительно высокой температурой в юго-западной части Карского моря (до 8–10 °С) и малой на северо-востоке моря (4–5 °С) [4]. Средняя соленость вод составляет 30–32 PSU, что гораздо выше в сравнении с другими водными массами данного региона [4–5]. Таким образом, средние многолетние оценки индексов баренцевоморских вод совпадают с количественными оценками 2 класса, полученными в ходе проведенной кластеризации.

Показанное в данном примере положение вод 3 и 4 класса (рис. 2, б) соотносится с «центральный» типом распространения вод ПОС, который встречается довольно часто [10]. ПОС, согласно [7], характери-

Таблица 2

Table 2

Количественные оценки характеристик ТПМ, СПМ, АДТ и их градиентов по результатам кластеризации в августе 2019 г.: \bar{T} — ТПМ; $\nabla\bar{T}$ — градиент ТПМ; \bar{H} — АДТ; \bar{S} — СПМ; $\nabla\bar{S}$ — градиент СПМ; s — площадь класса
Quantitative estimates of the characteristics of SST, SSS, ADT and their gradients based on the results of clustering in August 2019: \bar{T} — SST; $\nabla\bar{T}$ — SST gradient; \bar{H} — ADT; \bar{S} — SSS; $\nabla\bar{S}$ — SSS gradient; s — class area

| Параметры | 1 класс | 2 класс | 3 класс | 4 класс |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| \bar{T} , °С | 5,9 | 4,7 | 7,8 | 8,6 |
| $\nabla\bar{T}$, °С/км | 0,05 | 0,04 | 0,06 | 0,04 |
| \bar{H} , см | –6,9 | –20,4 | 1,6 | 7,5 |
| \bar{S} , PSU | 28,0 | 32,6 | 19,5 | 12,8 |
| $\nabla\bar{S}$, PSU/км | 0,07 | 0,06 | 0,11 | 0,08 |
| $s*10^3$, км ² | 378 | 168 | 96 | 138 |

зуется пониженной соленостью (~15 PSU) и высокими значениями температуры (~8 °C), что также схоже с оценками 3 и 4 класса (табл. 2). Однако проведенные ранее экспедиционные исследования [7–9] и анализ спутниковых данных [10] отмечают наличие нескольких отдельных фронтальных разделов на западной, восточной и центральной границах ПОС. Это дает возможность предположить, что 3 класс, отличающийся максимальной величиной градиентов ТПМ и СПМ, относится к выделенным ранее фронтальным разделам на внешней границе ПОС. Четвертый класс, характеризующийся пониженными значениями солености и градиентов СПМ (табл. 2), является внутренней линзой вод ПОС (рис. 2, б).

Положение вод 3 класса, полученное по результатам кластеризации, схоже с исследованием [8–9], где рассматривались расположения фронтов разного генезиса, связанных с областью ПОС. Воды данного класса имеют среднюю соленость 19 PSU и занимают промежуточное положение между карскими водами (28 PSU) и внутренней линзой ПОС (12 PSU). У 3 класса наблюдаются максимальные градиенты ТПМ и СПМ, что, согласно классификации [14], подтверждает его отождествление к фронтальной зоне. Анализ полученных результатов позволяет отнести данный класс к водам СФЗ, которые формируются на границе между карскими водами (1 класс) и внутренней линзой ПОС (4 класс).

Таким образом, в рамках проведенной кластеризации и её анализа удалось выделить четыре типа вод: баренцевоморские, карские, СФЗ и внутренней линзы ПОС.

4.2. Средняя многолетняя изменчивость СФЗ

Выполнение кластерного анализа дало возможность получить многолетние количественные оценки изменчивости характеристик СФЗ за безледный период. В таблице 3 представлены осредненные многолетние параметры за теплый сезон по месяцам (июль, август, сентябрь, октябрь) за период с 2002 по 2020 гг., а также средние характеристики СФЗ за весь период исследования.

Средние многолетние оценки ТПМ за каждый месяц отражают общий годовой ход с максимумом в августе. Величина градиентов ТПМ и СПМ в течение теплого сезона выше фоновых градиентов Карского моря в среднем в два раза [1], максимум градиентов регистрируется в июле. Минимальные значения АДТ наблюдаются в июле, а максимального значения достигают в октябре. Площадь поверхностной СФЗ за теплый сезон увеличивается, максимума достигает в сентябре и затем идет на спад. Зона повышенных градиентов, ассоциируемых с СФЗ, занимает до 15% площади Карского моря. Стоит отметить, что за октябрь не удалось получить средние многолетние оценки солености СФЗ из-за отсутствия данных в большинстве рассматриваемых лет.

Анализ пространственной изменчивости показал наличие сезонного хода в динамике СФЗ. В июле СФЗ располагается в центральной части моря и имеет довольно узкую площадь распространения. Северная граница зоны располагается у арх. Новая Земля, а южные границы у полуостровов Ямал и Таймыр. В августе площадь зоны значительно увеличивается, и её северная граница смещается ближе к Сибирскому побережью. Особенно сильно область фронтальной зоны увеличивается на востоке. Сентябрь характеризуется полным смещением зоны СФЗ на восток. Площадь зоны сильно не уменьшается, однако СФЗ вытягивается на восток до 95° в.д. В октябре площадь СФЗ значительно уменьшается, а сама зона полностью располагается вдоль восточной части Сибирского побережья. Важно отметить, что западная часть СФЗ во все месяцы исследования располагается вблизи полуострова Ямал.

Таблица 3

Table 3

Средние многолетние по месяцам и средние за весь период исследования количественные характеристики СФЗ:

\bar{T} — ТПМ; $\nabla\bar{T}$ — градиент ТПМ; \bar{H} — АДТ; \bar{S} — СПМ; $\nabla\bar{S}$ — градиент СПМ; s — площадь СФЗ

Average long — term monthly and average for the entire period of the study quantitative characteristics of the RPFZ:

\bar{T} — SST; $\nabla\bar{T}$ — SST gradient; \bar{H} — ADT; \bar{S} — SSS; $\nabla\bar{S}$ — SSS gradient; s — area of the RPFZ

| Месяц | \bar{T} , °C | $\nabla\bar{T}$, °C/км | \bar{H} , см | \bar{S} , PSU | $\nabla\bar{S}$, PSU/км | $s \cdot 10^3$, км ² |
|----------|----------------|-------------------------|----------------|-----------------|--------------------------|----------------------------------|
| Июль | 5,4 | 0,10 | -0,8 | 18,6 | 0,14 | 130 |
| Август | 6,3 | 0,06 | 1,2 | 22,6 | 0,10 | 159 |
| Сентябрь | 4,3 | 0,08 | 5,9 | 25,7 | 0,10 | 175 |
| Октябрь | 2,8 | 0,08 | 9,3 | — | 0,06 | 157 |
| Среднее | 4,7 | 0,08 | 3,9 | 22,3 | 0,10 | 155 |

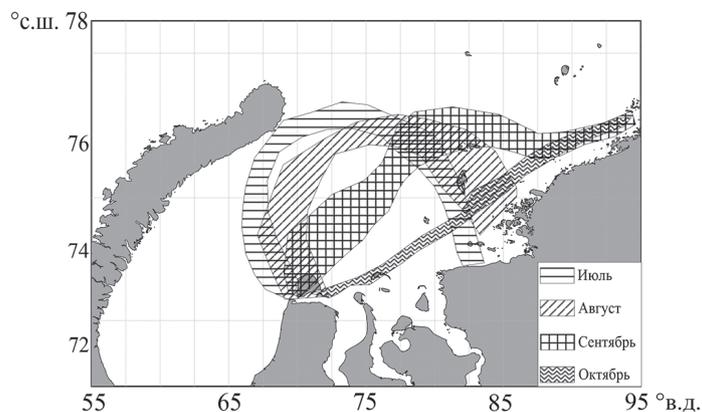


Рис. 3. Средние положения СФЗ с июля по октябрь за период 2002–2020 гг.

Fig. 3. Average RPFZ positions from July to October for the period from 2002 to 2020

4.3. Межгодовая изменчивость СФЗ

Изменчивость характеристик температуры и её градиента в СФЗ за весь рассматриваемый период представлена на рис. 4. Видно, что с 2002 по 2020 гг. ТПМ в СФЗ колеблется от 1 °С в октябре до 9,9 °С в августе. Чаще всего максимальные значения поверхностной температуры регистрируются в августе, минимальные значения ТПМ наблюдаются в октябре. В период с 2002 по 2010 гг. параметры ТПМ в каждый сезон соответствуют годовому ходу температур в Карском море: минимальные значения наблюдаются осенью, а максимальные — летом. Однако с 2011 по 2020 гг. наблюдаются выраженные положительные и отрицательные аномалии характеристик ТПМ в СФЗ. Например, в августе 2014 и 2018 гг. ТПМ составляет 3,1 °С, что почти в два раза ниже средних оценок, полученных за весь период исследования (табл. 3). При этом в последние пять лет наблюдается положительный тренд поверхностной температуры в СФЗ, на величину которого влияют максимумы в августе 2015 ($\bar{T} = 8,8$ °С) и 2020 ($\bar{T} = 9,9$ °С) г.

Величина градиента ТПМ в СФЗ за период с 2002 по 2020 гг. характеризуется значительной неоднородностью. В среднем температурный градиент в СФЗ меняется от 0,03 °С/км в августе 2020 г. до 0,17 °С/км

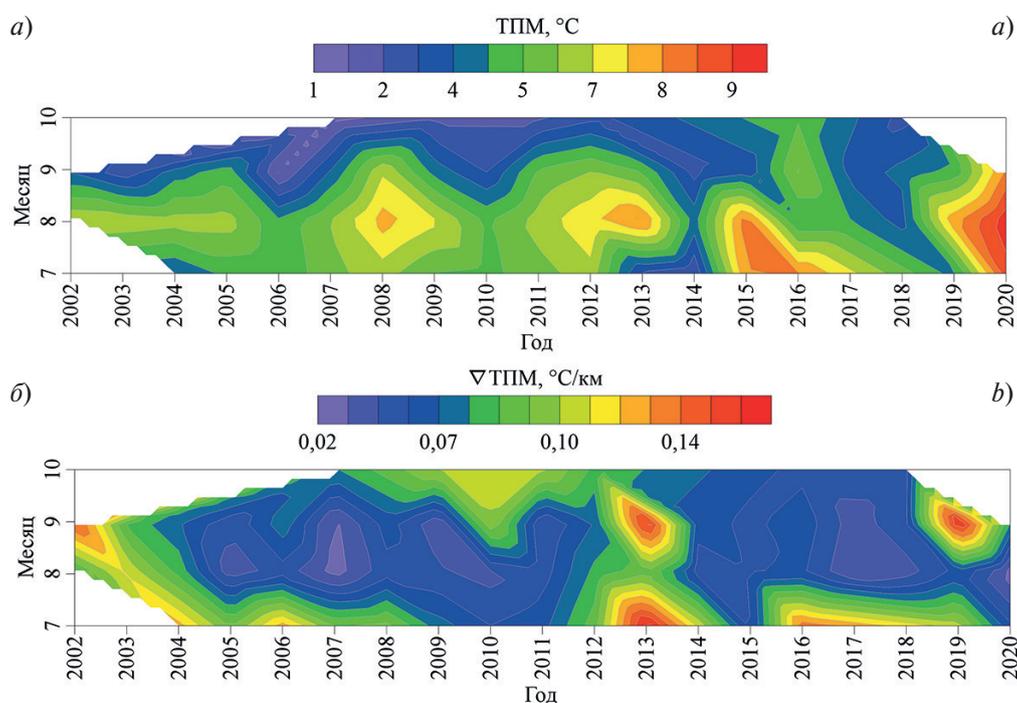


Рис. 4. Параметры ТПМ (а) и градиентов ТПМ (б) в СФЗ за период с июля по октябрь 2002–2020 гг.

Fig. 4. The SST parameters (a) and the SST gradients (b) in the RPFZ for the period from July to October 2002–2020

в июле 2013 г. Многолетняя изменчивость градиента ТПМ показала, что максимумы чаще всего отмечаются в июле и сентябре, тогда как минимумы в августе и октябре. Таким образом, значение градиента за отдельный месяц может отличаться от средней многолетней величины градиента СФЗ более чем в два раза (табл. 3). В отдельные месяцы наблюдается обратная связь между параметрами градиента ТПМ и значениями поверхностной температуры вод: в июле 2013 г. ($\bar{T} = 2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\nabla\bar{T} = 0,17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$), августе 2015 г. ($\bar{T} = 8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\nabla\bar{T} = 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$) и сентябре 2019 г. ($\bar{T} = 4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\nabla\bar{T} = 0,17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$). Важно также отметить, что во втором десятилетии XXI века градиент температуры в среднем уменьшился на $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

Ввиду относительно позднего начала работы спутника NASA SMAP по сравнению с другими системами (табл. 1), данные о поверхностной солёности в СФЗ доступны только за период с 2015 по 2020 гг. (рис. 5, а). Характеристики СПМ меняются от минимума в июле ($\bar{S} = 17\text{ PSU}$) до максимума в сентябре ($\bar{S} = 29\text{ PSU}$). В июле в большинстве лет наблюдаются солоноватые воды, значение поверхностной солёности которых не превышает 17–19 PSU. В августе начинается постепенное увеличение значений СПМ, а максимальных значений величина достигает в сентябре. В целом наблюдается постепенное уменьшение СПМ в СФЗ в среднем на 3–5 PSU. Однако в полученных межгодовых оценках не наблюдаются значительные отклонения при их сопоставлении со средними значениями СПМ в СФЗ (табл. 3).

Колебания градиентов СПМ (рис. 5, б) за период исследования составляют от $0,08\text{ PSU}/\text{км}$ в сентябре до $0,19\text{ PSU}/\text{км}$ в июле 2016 г. Максимальная изменчивость градиентов поверхностной солёности отмечается в августе и сентябре. Относительно стабильное значение градиента наблюдается в июле и октябре. Августы 2015 и 2018 гг. выделяются на фоне общей изменчивости аномально низкими значениями градиента СПМ ($\nabla\bar{S} = 0,09\text{ PSU}/\text{км}$). Данная отрицательная аномалия отражается в характеристиках поверхностной температуры и градиентов ТПМ (рис. 5). Неоднородность параметров градиента поверхностной солёности осложняет его сопоставление со средним значением, представленным в разделе 4.2 (табл. 3).

Изменчивость характеристик АДТ в СФЗ представлена на рисунке 6, а. Минимальное значение АДТ зарегистрировано в августе 2004 г. ($\bar{H} = -7,1\text{ см}$), а максимальное — в октябре 2007 г. ($\bar{H} = 18,1\text{ см}$). Наблюдается внутрисезонный ход, который характеризуется минимумами в летние месяцы и максимумами в осенние. Полученные расчеты показывают наличие отрицательных (2004, 2008, 2015, 2017 гг.) и положительных (2013, 2016 гг.) аномалий АДТ. Однако положительная средняя величина уровня за период 2002–2020 гг. (табл. 3) сопоставима с результатами межгодовой изменчивости параметров АДТ.

Изменение площади СФЗ по результатам проведённого анализа представлено на рис. 6, б. Минимальное значение площади СФЗ отмечается в июле 2016 г. ($s = 55\text{ тыс. км}^2$), а максимум в сентябре 2007 г. ($s = 340\text{ тыс. км}^2$). Важно отметить, что внутрисезонный ход площади СФЗ характеризуется большой неоднородностью. Например, в 2011 г. ежемесячное значение площади практически не менялось и составляло в среднем 200–210 тыс. км². При этом, в 2009 г. за четыре месяца величина площади менялась от 50 до 160 тыс. км². Анализ многолетней изменчивости показывает, что в первом десятилетии XXI века в среднем площадь была в 4 раза больше по сравнению с периодом 2012–2020 гг. Перелом в изменчивости характеристик произошел в 2012 г., когда площадь уменьшилась с 220 до 89 тыс. км². В период с 2012 по 2020 гг. наблюдается отрицательный тренд, площадь СФЗ значительно сокращается.

Анализ внутрисезонной и межгодовой пространственной изменчивости позволил выявить несколько типов пространственного распространения СФЗ и внутренней области ПОС, которые представлены на рис. 7.

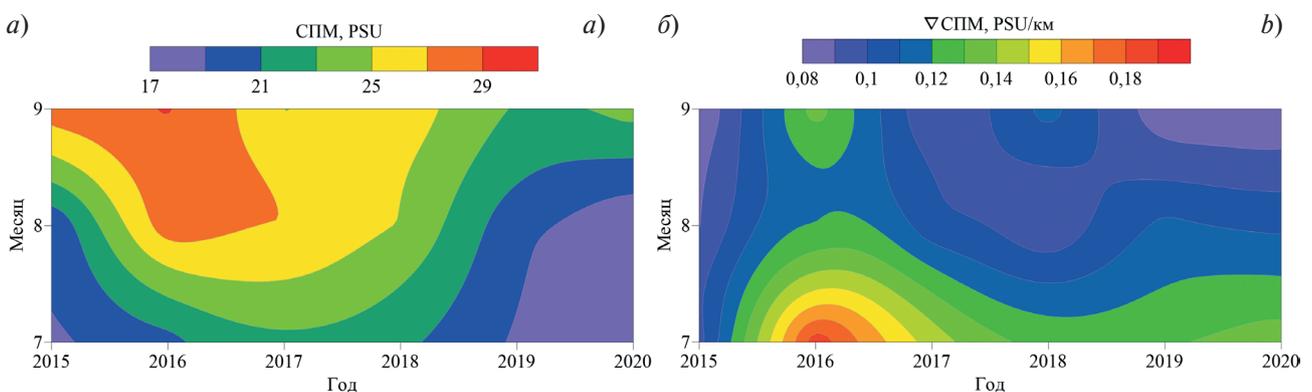


Рис. 5. Параметры СПМ (а) и градиентов СПМ (б) в СФЗ за период с июля по сентябрь 2002–2020 гг.

Fig. 5. The parameters of the SSS (a) and the SSS gradients (b) in the RPFZ for the period from July to September 2002–2020

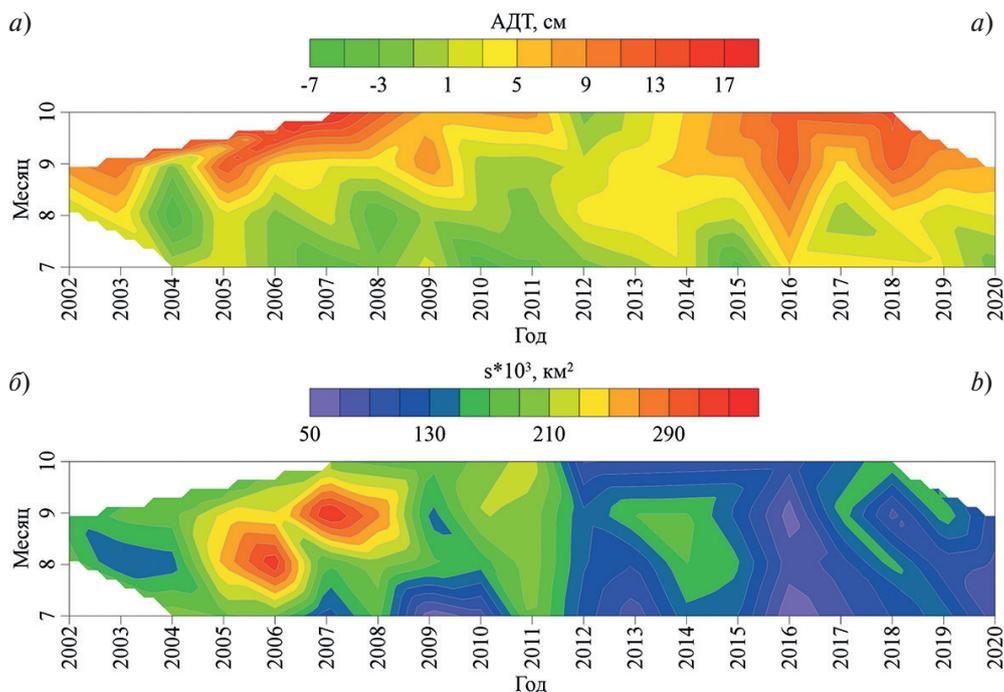


Рис. 6. Параметры АДТ (а) и площади (б) СФЗ за период с июля по октябрь 2002–2020 гг.

Fig. 6. The parameters of the ADT (a) and the area (b) of the RPFZ for the period from July to October 2002–2020

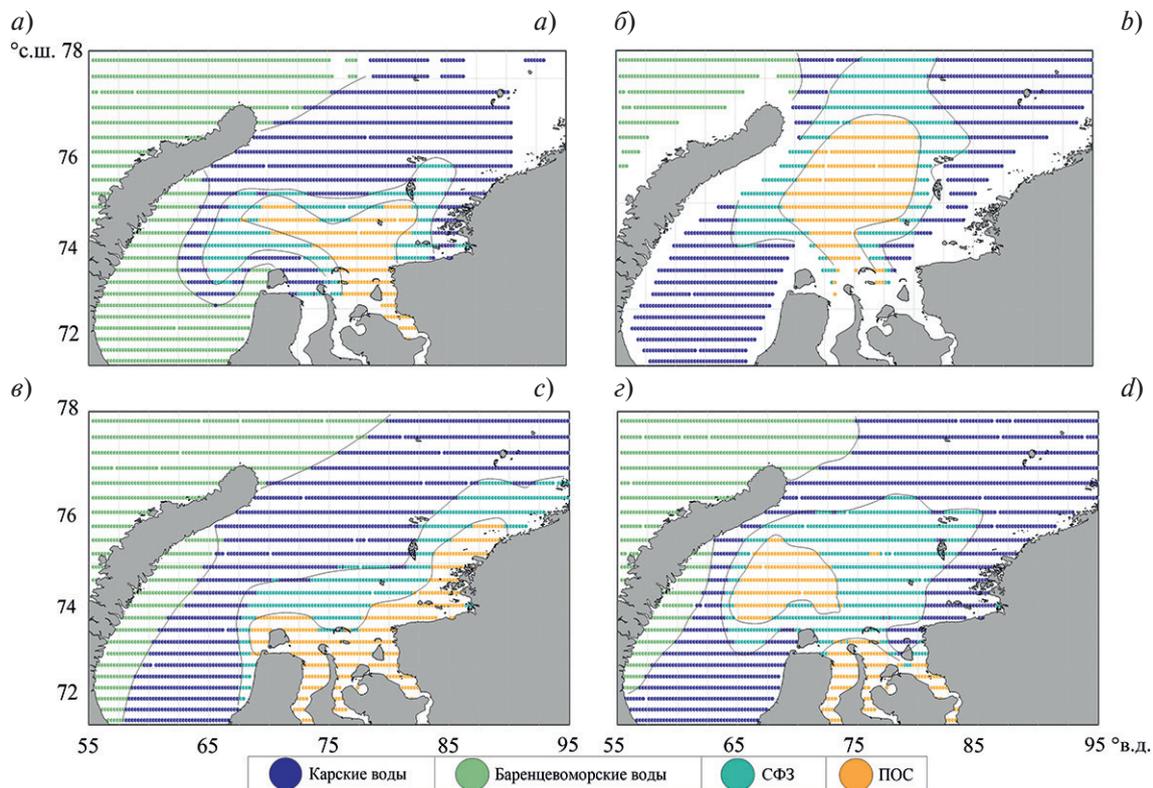


Рис. 7. Типы пространственной изменчивости основных водных масс и СФЗ (бирюзовый цвет) по результатам кластерного анализа: а — западный тип на примере июля 2007 г.; б — центральный тип на примере августа 2015 г.; в — восточный тип на примере сентября 2009 г.; г — нестандартный тип на примере августа 2011 г.

Fig. 7. Types of spatial variability of the main water masses and RPFZ (3th class) according to the results of cluster analysis: a — western type on the example of July 2007; b — central type on the example of August 2015; c — eastern type on the example of September 2009; d — atypical type on the example of August 2011

«Западный» тип (рис. 7, а) характеризуется положением СФЗ в районе 55–65° в.д. у западной части арх. Новой Земли. Видно, что внутренняя часть ПОС также в большей степени выделяется на западе, а баренцево-морские воды практически полностью занимают юго-западную часть моря. «Центральный» тип (рис. 7, б) характеризуется расположением СФЗ в районе между 65–85° в.д. Западная и восточная граница СФЗ вблизи речного стока рек Оби и Енисея тонкая, а ближе к центру увеличивается. Внутренняя область ПОС находится в СФЗ и соединена с устьевыми участками рек. При таком положении фронтальной зоны также наблюдается преобладание карских вод на поверхности моря. «Восточный» тип (рис. 7, в) распространения характеризуется расположением СФЗ вдоль Сибирского побережья: от полуострова Ямал до восточной оконечности полуострова Таймыр. При относительной большой длине распространения (от 65 до 95° в.д.) сама СФЗ довольно узкая. Внутренняя область ПОС оказывается прижатой к устьевым участкам рек и берегу. «Нестандартный» тип (рис. 7, г) СФЗ наблюдается при полном окружении фронтальной зоной внутренней области ПОС, которая делится на ряд изолированных участков. Основным признаком данного типа распределения заключается в том, что линза внутренней области ПОС отрывается от устьевых участков рек. При таком распространении СФЗ располагается на периферии внутренней области ПОС и занимает большую площадь.

4.4. Влияние речного стока и ледяного покрова на изменчивость параметров СФЗ

Сезонная изменчивость характеристик. Наиболее важной региональной особенностью Карского моря, которая влияет на формирование ПОС и СФЗ, является изменчивость речного стока крупных сибирских рек Оби и Енисея [1–2, 30]. Кроме того, на характеристики поверхностного слоя вод моря в целом оказывают влияние особенности ледовых условий [1, 31]. Средние многолетние оценки этих процессов представлены в таблице 4.

Средняя многолетняя изменчивость суммарного речного стока Оби и Енисея характеризуется выраженным максимумом в июне (100 тыс. м³/с) и минимумом в октябре (25 тыс. м³/с), что связано с началом половодья и меженью рек [30]. В мае также наблюдается максимальная площадь и сплоченность ледяного покрова, которая резко начинает уменьшаться в июне. Далее наблюдается постепенное снижение расхода рек в середине лета и практически полное освобождение центральной части Карского моря ото льдов. Минимальный уровень стока за теплый сезон наблюдается в осенний период. Минимальная площадь и сплоченность ледяного покрова наблюдается в сентябре, после отмечается их постепенный рост в октябре.

Сопоставление средних многолетних параметров СФЗ (табл. 3) и речного стока показало, что в июле за счет воздействия большого объема речных вод в СФЗ наблюдаются максимумы градиентов ТПМ и СПМ и минимумы величин СПМ и АДТ. При этом площадь СФЗ минимальна в этом месяце, что связано с процессами интенсификации перемешивания на фоне увеличенного стока рек и недостаточного радиационного прогрева. Уменьшение поверхностного температурного и соленостного градиента и увеличение ТПМ в СФЗ в августе, вероятно, связано с минимизацией неоднородных зон температуры и солености за счет значительного сокращения области влияния таяния льдов и увеличения притока солнечной радиации [1, 7]. Снижение объема теплых речных вод Оби и Енисея в августе приводит к стабилизации фронтальной зоны и росту значений СПМ, АДТ в СФЗ, а также увеличению её площади. В сентябре резкое сокращение

Таблица 4
Table 4

Средние многолетние оценки речного стока Оби и Енисея, площади ледяного покрова и его сплоченности с мая по октябрь за 2002–2020 гг.

Average long-term estimates of the river discharge of the Ob and Yenisei, the area of the ice cover and its concentration from May to October for 2002–2020

| Месяц | Сток Оби, м ³ /с | Сток Енисея, м ³ /с | Площадь льда, км ² *10 ³ | Сплоченность, % |
|----------|-----------------------------|--------------------------------|--|-----------------|
| Май | 19465 | 36572 | 532 | 87 |
| Июнь | 32307 | 66095 | 332 | 60 |
| Июль | 21166 | 49959 | 188 | 23 |
| Август | 16548 | 37928 | 25 | 7 |
| Сентябрь | 13612 | 31639 | 13 | 3 |
| Октябрь | 10797 | 15041 | 204 | 22 |

объёмов речного стока и отсутствие влияния таяния льдов в данном районе определяют продолжающийся рост значений АДТ, СПМ и площади СФЗ. Величина градиента ТПМ увеличивается, а значения поверхностной температуры в СФЗ уменьшается. Вероятно, это связано с уменьшением притока солнечной радиации и началом процессов выхолаживания [1] в Карском море. При этом, величина градиента СПМ в СФЗ не изменяется по сравнению с прошлыми месяцами. В октябре отмечается максимальная величина АДТ в СФЗ, что связано с началом осенней межени рек Оби и Енисея [30]. В результате интенсивного выхолаживания всей толщи вод Карского моря, сформированного отрицательными температурами воздуха [3], параметры ТПМ и площади СФЗ значительно уменьшаются. При этом из-за роста площади и сплоченности льдов [1, 3] возникает все больше неоднородностей в полях термохалинных характеристик, что приводит к относительно большой величине температурного градиента СФЗ.

Межгодовая изменчивость характеристик. Оценки характеристик речного стока, площади и сплоченности ледяного покрова по годам представлены на рис. 8. При этом, наблюдаются положительные (2002 г. — 61 тыс. м³/с; 2007 г. — 58 тыс. м³/с; 2014 г. — 56 тыс. м³/с; 2015 г. — 57 тыс. м³/с) и отрицательные аномалии (2012 г. — 35 тыс. м³/с) суммарного стока. Площадь и сплоченность ледяного покрова имеют общий отрицательный тренд, который особенно выражен в отдельные годы (2011 г. — 136 тыс. км², 23%; 2012 г. — 133 тыс. км², 26%; 2016 г. — 153 тыс. км², 20%; 2020 г. — 120 тыс. км², 19%). Важно отметить, что в некоторые годы (2011–2014 гг.; 2014–2016 гг.) величина суммарного стока рек и площадь со сплоченностью ледяного покрова изменяются квазисинхронно.

Сопоставление межгодовых параметров стока и льда с характеристиками СФЗ показало, что общий рост поверхностной температуры СФЗ (рис. 4, а) за период с 2002 по 2020 гг. формируется на фоне отрицательных величин площади, сплоченности ледяного покрова и стока рек. Стоит отметить, что относительно низкая ТПМ в СФЗ (4,7 °С) в 2010 г. совпадает с малыми значениями площади и сплоченности ледяного покрова. Резкое увеличение объема речного стока рек Оби и Енисея, площади и сплоченности ледяного покрова совпадает по времени с минимальными значениями ТПМ в СФЗ в 2011 г. и 2018 г. Рост значений ТПМ в СФЗ в 2016 г., 2019–2020 гг. соотносится с уменьшением сплоченности и площади ледяного покрова. Таким образом, значительные колебания поверхностной температуры СФЗ во второе десятилетие XXI века на фоне уменьшения площади и сплоченности льдов отражают глобальные климатические изменения, происходящие в Арктике [32].

Большая величина градиента ТПМ в СФЗ, зафиксированная в 2002 и в 2013 гг., совпадает с годом увеличенного объема речного стока на фоне повышенных значений сплоченности ледяного покрова. Рост температурного градиента в эти годы, вероятно, возникает в результате увеличения температурных контрастов между большим объемом теплых речных и охлажденных льдом морских вод. Малые значения градиента ТПМ в СФЗ возникают на фоне небольшой величины площади и сплоченности льдов, которая уменьшает температурный контраст между морскими и речными водами.

Изменение поверхностной солёности в СФЗ в общих чертах соотносится с изменением речного стока Оби и Енисея: малая величина солёности отмечается в конце весеннего половодья, а увеличение — в начале осенней межени [30]. Эти же процессы отражаются и на величине градиента СПМ в СФЗ.

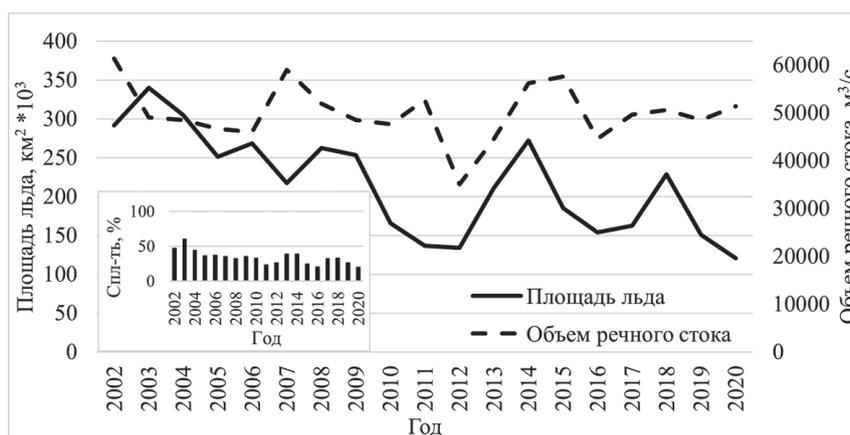


Рис. 8. Межгодовые оценки (2002–2020 гг.) речного стока Оби и Енисея, площади ледяного покрова и его сплоченности в районе исследования

Fig. 8. Interannual estimates (2002–2020) of river discharge Ob and Yenisei, sea ice cover area and its state in the study area

Многолетние колебания уровня (рис. 6, *a*) в период с 2002 по 2010 гг. в целом стабильны, что связано с малой амплитудой изменчивости речного стока в данный период. Значительное уменьшение объема речных вод Оби и Енисея в 2011 г. находит отражение в наблюдающейся положительной аномалии АДТ.

Максимальные значения площади СФЗ в первую декаду XXI века (2006 г., 2007 г.) соотносятся с большими объемами речного стока Оби и Енисея, которые увеличивают зону распространения речных вод в Карском море. В период с 2011 по 2020 гг. величина площади значительно уменьшается, однако амплитуда её изменчивости возрастает. Малая величина площади СФЗ в 2012 и 2016 г. отмечается при минимальных значениях речного стока и характеристик льда. Вероятно, возникающая на фоне относительно стабильных значений ТПМ и СПМ гомогенизация вод приводит к минимизации неоднородных зон, и, как следствие, площади СФЗ.

Корреляционный анализ показал, что объем речного стока Енисея имеет значимый коэффициент корреляции за июль ($r = 0,61$) и август ($r = 0,51$) со значениями площади СФЗ в сентябре. Вероятно, большие объемы речного стока в первые месяцы лета формируют значительную площадь ПОС, которая затем интенсивно перемешивается с морскими водами в сентябре, что отражается на росте площади СФЗ в последующие месяцы. Площадь и сплоченность льдов за октябрь предыдущего года коррелирует с июльскими значениями температуры ($r = -0,72$) и августовскими значениями градиента ТПМ ($r = 0,58$) в СФЗ. Возможная причина такой связи кроется в том, что площадь образовавшихся в октябре льдов является индикатором объема теплозапаса вод моря [31], сформированного за теплый сезон. В результате величина теплозапаса влияет на уменьшение температуры моря в период образования фронтальной зоны, что по мере прогрева поверхностного слоя отражается на интенсификации температурного градиента СФЗ.

4.5. Влияние ветра на изменчивость характеристик СФЗ

Одним из ключевых факторов, влияющих на поверхностную динамику вод Карского моря является ветровое воздействие [1, 3]. Для анализа связи ветровой динамики и положения фронтальной зоны были построены композитные карты, представленные на рис. 9.

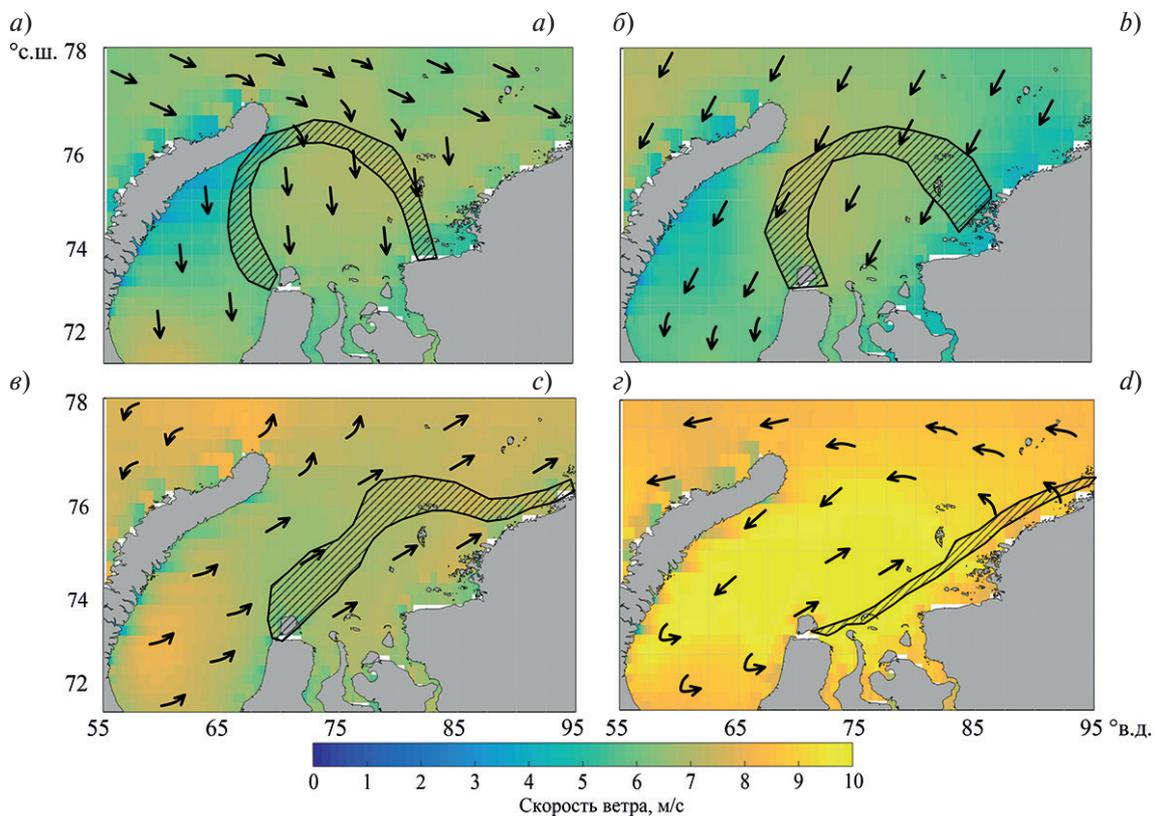


Рис. 9. Композитная карта скорости и направления ветра над акваторией Карского моря и положений СФЗ по средним многолетним данным 2002–2020 гг.: *a* — июль, *b* — август, *c* — сентябрь, *d* — октябрь

Fig. 9. Composite map of wind speed and direction over the Kara Sea and RPFZ positions according to the average multiyear data of 2002–2020: *a* — July, *b* — August, *c* — September, *d* — October

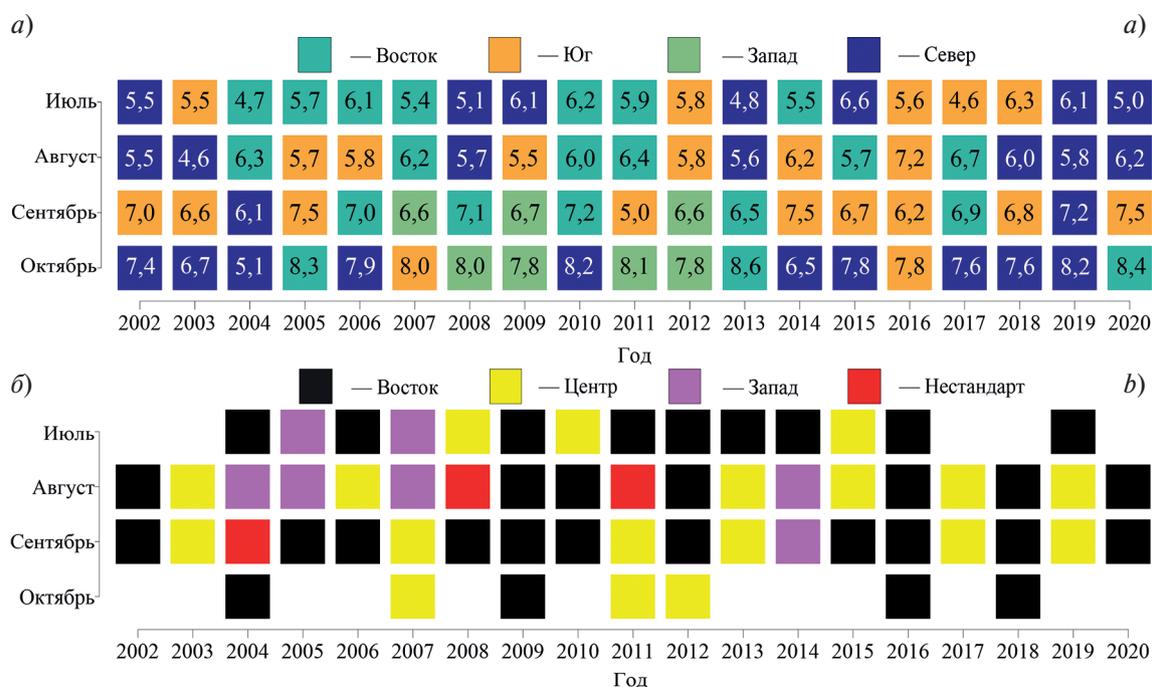


Рис. 10. Скорость и направление ветра (а), и типы распространения СФЗ (б) за период с июля по октябрь 2002–2020 гг.

Fig. 10. Wind speed and direction (a), and types of RPFZ propagation (b) for the period from July to October from 2002 to 2020

В июле под влиянием северного ветра в приповерхностных слоях моря возникают течения юго-восточного направления. В результате СФЗ вытягивается от полуострова Ямал до северной оконечности арх. Новая Земля. Схожая картина наблюдается в августе, однако СФЗ слегка отодвигается на юг и смещается в центр Карского моря. В сентябре скорость ветра увеличивается, что усиливает влияние поверхностных ветровых течений и влечет за собой смену положения СФЗ, которое характеризуется смещением зоны к Сибирскому побережью. Усиление юго-западных ветров на фоне отрицательных температур воздуха [15] и значительного уменьшения речного стока в октябре (табл. 4) приводит к еще большему сдвигу положения СФЗ на юг к Сибирскому побережью.

Сопоставление характеристик ветра (рис. 10, а) с характеристиками площади СФЗ (рис. 4, б) показало, что в периоды её максимумов (2006–2007 гг.) наблюдается западный ветер средней силой до 6 м/с, а минимумы (2012, 2016 гг.) возникают под воздействием ветров южных и восточных румбов со средней скоростью более 6 м/с.

Из рис. 10, б видно, что наиболее часто встречающийся «восточный» тип распространения СФЗ наблюдается при южных и юго-западных ветрах со скоростью более 6 м/с. Данный ветер интенсифицирует движение линзы пресных вод вдоль Сибирского побережья, которая формируется под влиянием силы Кориолиса. Для «центрального» типа СФЗ характерны ветры северных румбов со скоростью более 6,5 м/с, сила которых ослабляет основное геострофическое течение вдоль берега. Это приводит к смещению ПОС на запад от Сибирского побережья в центральную часть Карского моря. Редкий «западный» тип распространения СФЗ формируется восточными ветрами со скоростью более 6 м/с. Вероятно, усиление экмановского переноса смещает поверхностный циклонический круговорот в центральной части Карского моря [1], что приводит к отклонению линзы пресных вод на запад. Условия для появления «нестандартного» типа распространения СФЗ характеризуются преобладанием ветров северных румбов со скоростью чуть более 6 м/с. Малая величина силы ветра ослабляет экмановский перенос, что приводит к формированию обширных фронтальных зон, разделению вод внутренней линзы ПОС на части и формированию «нестандартного» типа распространения СФЗ.

4.6. Влияние атмосферной циркуляции над Северной Евразией на характеристики СФЗ

Карское море преимущественно находится под влиянием полярного климата [3]. В результате, влияние процессов переноса воздушных масс, связанных с глобальной атмосферной циркуляцией, на климат данного моря довольно велико [1]. Для анализа были привлечены осредненные индексы СК (отражает зональный перенос) и ПК (отражает меридиональный перенос). Временной ход индексов представлен на рис. 11.

Пространственно-временная изменчивость характеристик стоковой фронтальной зоны в Карском море...
 Spatial and temporal variability of the characteristics of the river plume frontal zone in the Kara Sea...

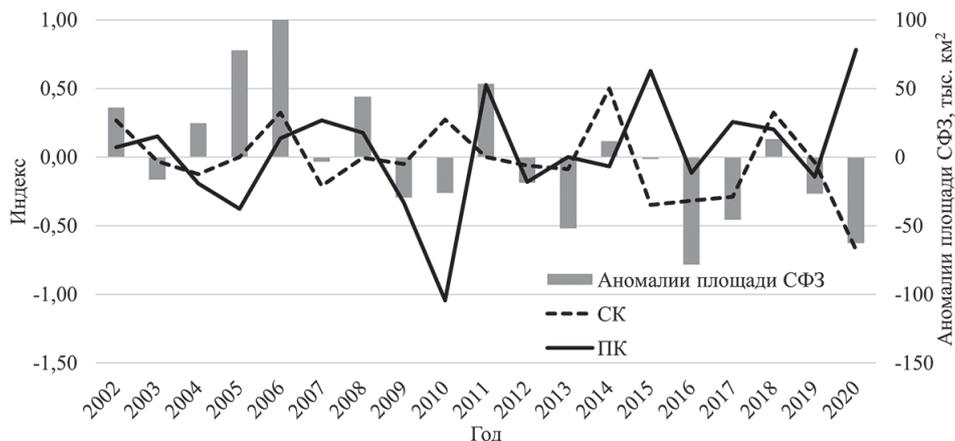


Рис. 11. Межгодовая динамика осредненных летних индексов атмосферной циркуляции Скандинавского колебания (штрих-линия) и зимних индексов Полярного колебания (сплошная линия), а также аномалий площади СФЗ за летний период (отклонение от среднего значения за весь период исследования, серые столбцы)

Fig. 11. Interannual dynamics of the averaged summer atmospheric circulation indices of the SCAND (dashed line), winter indices of the POL (solid line), and RPFZ anomalies (deviation from the average value for the entire study period, gray columns) of the area over the summer period

Изменчивость колебания СК в целом характеризуется отрицательными значениями. Минимальное значение ($-0,67$) колебания СК отмечается в 2020 г., а максимальное ($0,18$) в 2010. Средняя межгодовая амплитуда составляет $0,9-1,0$. С 2019 г. наблюдается отрицательная фаза, что отражается на ослаблении зонального переноса теплого атлантического воздуха и процессов блокировки циклонов, проходящих с запада на восток. Изменчивость индекса ПК (черная линия) характеризуется в основном положительными значениями. Минимум индекса ($-1,04$) отмечается в 2010 г., а максимум ($0,78$) в 2020 г. Размах межгодовых колебаний составляет $1,8-2$. В период с 2019 по 2020 гг. данный индекс характеризуется положительной фазой, что отражает усиление меридионального переноса холодного арктического воздуха из Арктики и увеличение количества проходящих циклонов с севера на юг.

Взаимный анализ межгодовой изменчивости параметров СФЗ и индексов глобальной атмосферной циркуляции показал, что большая величина градиентов ТПМ в СФЗ в 2010, 2016 и 2019 гг. отмечается в период отрицательной фазы индексов ПК. Вероятно, на фоне ослабления меридионального переноса холодного воздуха с Арктики в Евразию [29] происходит усиление выхолаживания морских вод, при этом речные воды остаются теплыми, что далее сказывается на интенсивности градиента ТПМ в СФЗ. Минимальные значения градиентов ТПМ в СФЗ в 2010, 2018 и 2020 гг. регистрируются при росте индексов СК. Скорее всего, это связано с интенсификацией зональной атмосферной циркуляции [29], которая увеличивает поступление тёплого воздуха из Атлантики и минимизирует неоднородности градиента ТПМ. Максимальные значения площади СФЗ в 2006 г. соотносятся с ростом обоих индексов атмосферной циркуляции. Минимальные значения площади СФЗ в 2012 и 2016 гг. регистрируются в отрицательной фазе с индексами СК и ПК. Возможно, уменьшение интенсивности глобального переноса на фоне значительного таяния ледяного покрова отразилось на интенсивности прогрева вод, что повлияло на величину площади СФЗ.

Корреляционный анализ атмосферной циркуляции с параметрами СФЗ показал наличие связи между летним индексом СК ($r = 0,65$) и летней площадью СФЗ. Возможной причиной такой связи является усиление зонального переноса [28], который повлиял на региональную ветровую циркуляцию, определяющую распространение поверхностных вод СФЗ.

5. Заключение

Одним из наиболее важных результатов данной работы являются полученные многолетние оценки пространственно-временной изменчивости и параметров СФЗ в Карском море как отдельной гидрологической структуры вод.

Впервые для данного региона при определении физико-географических характеристик СФЗ была применена универсальная методика, в основу которой легло использование кластерного анализа на базе комплексных данных спутникового дистанционного зондирования. Метод достаточно прост в использовании и пригоден для выделения фронтальных зон в различных морях арктического региона.

В работе рассчитаны и представлены средние многолетние и межгодовые количественные характеристики поверхностных проявлений СФЗ. Многолетний градиент ТПМ в фронтальной зоне за весь период исследования составил $0,08$ °С/км, СПМ — $0,1$ PSU/км, а площадь — 155 тыс. км². Описаны средние многолетние положения СФЗ в теплый период года. Изменчивость межгодовых оценок градиента ТПМ в СФЗ составила от $0,03$ до $0,17$ °С/км, градиента СПМ от $0,06$ до $0,19$ PSU/км, а площади от 50 до 340 тыс. км². Наблюдается наличие значительных аномалий разного знака практически по всем параметрам СФЗ во второй декаде XXI века. Особенно сильно это отражается в поверхностных градиентах температуры, которые в среднем в два раза выше фоновых величин. Градиент температуры поверхностной СФЗ за вторую декаду XXI века ослаб на $0,04$ °С/км, а её площадь за тот же период в среднем уменьшилась на 100 тыс. км². Полученные результаты указывают на значительную изменчивость СФЗ за последние 20 лет на фоне отмечаемых глобальных изменений в климате Арктики [32].

Анализ корреляционных оценок показал наличие статистически значимых связей региональных и глобальных процессов с параметрами вод СФЗ. Установлено, что наибольший вклад в изменчивость количественных характеристик СФЗ вносит речной сток Енисея и характеристики ледяного покрова (площадь и сплоченность). Большая величина индекса СК отражается на увеличении площади в СФЗ, что может быть связано с блокированием зонального переноса и увеличением осадков в зоне водосбора рек Оби и Енисея в различные периоды года.

Таким образом, полученные результаты многолетнего анализа СФЗ в Карском море за первые два десятилетия XXI века показали, что глобальные климатические изменения отражаются на характеристиках фронтальной зоны. Выявленные особенности многолетней изменчивости параметров могут быть типичными и для других СФЗ Арктики (Лены, Колымы, Макензи). Следующие работы будут направлены на исследование синоптической изменчивости СФЗ и создании модели прогноза её параметров.

Финансирование

Обработка данных о характеристиках фронтальной зоны выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-35-90053 аспиранты. Сопоставление и анализ связи параметров фронтальных зон и региональных и глобальных процессов выполнены в рамках государственного задания по теме № FMWE-2021-0014.

Funding

Data processing of the frontal zone characteristics was carried out within the framework of the RFBR grant No. 20–35–90053 postgraduate students. Comparison and analysis of the connection between the parameters of the frontal zones and regional and global processes was carried out as part of the State assignment Theme No. FMWE-2021–0014.

Литература

1. Pavlov V.K., Pfirman S.L. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 1995. Vol. 42, N 6. P. 1369–1390. doi:10.1016/0967–0645(95)00046–1
2. Harms I.H., Karcher M.J. Modeling the seasonal variability of hydrography and circulation in the Kara Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1999. Vol. 140, N C6. P. 13431–13448. doi:10.1029/1999jc900048
3. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: МГУ, 1982. 192 с.
4. Oziel L., Sirven J., Gascard J.-C. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011) // Ocean Science. 2016. Vol. 12, N 1. P. 169–184. doi:10.5194/os-12–169–2016
5. Barton B.I., Lique C., & Lenn Y.-D. Water mass properties derived from satellite observations in the Barents Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. Vol. 125. e2019JC015449. doi:10.1029/2019JC015449
6. Bauch D., Cherniavskaia E. Water Mass Classification on a Highly Variable Arctic Shelf Region: Origin of Laptev Sea Water Masses and Implications for the Nutrient Budget // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2018. Vol. 123, N 3. P. 1896–1906. doi:10.1002/2017jc013524

Пространственно-временная изменчивость характеристик стоковой фронтальной зоны в Карском море...
Spatial and temporal variability of the characteristics of the river plume frontal zone in the Kara Sea...

7. *Osadchiev A.A., Frey D.I., Shchuka S.A., Tilinina N.D., Morozov E.G., Zavalov P.O.* Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. P. 1–35. doi:10.1029/2020jc016486
8. *Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Поярко С.Г., Соловьев Д.М.* Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. Т. 50, № 5. С. 698–708.
9. *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 // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 4. С. 514. doi:10.7868/S0030157415040176
10. *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. Vol. 176. P. 177–187. doi:10.1016/j.rse.2016.01.020
11. *Polukhin A.A.* The role of river runoff in the Kara Sea surface layer acidification and carbonate system changes // *Environmental Research Letters*. 2019. Vol. 14. P. 105007. doi:10.1088/1748–9326/ab421
12. *Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Педченко А.П.* Оценка изменчивости характеристик Стоковой фронтальной зоны Карского моря на основе комплексирования данных спутникового дистанционного зондирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 2. С. 241–250. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-2-241-250
13. *Holmes R.M., Peterson B.J., Zulidov V.V. et al.* Nutrient chemistry of the Ob' and Yenisey Rivers, Siberia: Results from June 2000 expedition and evaluation of longterm data sets // *Marine Chemistry*. 2001. Vol. 75. P. 219–227. doi:10.1016/s0304–4203(01)00038-x
14. *Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
15. *Атаджанова О.А., Зимин А.В., Свергун Е.И., Коник А.А.* Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика в Баренцевом море // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 3. С. 237–246. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-237-246
16. *Zhuk V.R., Kubryakov A.A.* Interannual variability of the Lena River plume propagation in 1993–2020 during the ice-free period on the base of satellite salinity, temperature, and altimetry measurements // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, N 21. 4252. P. 1–20. doi: 10.3390/rs13214252
17. *Supply A., Boutin J., Vergely J.-L., Kolodziejczyk N., Reverdin G., Reul N., Tarasenko A.* New insights into SMOS sea surface salinity retrievals in the Arctic Ocean // *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 249. P. 112027. doi:10.1016/j.rse.2020.112027
18. *Janout M.A., et al.* Kara Sea freshwater transport through Vilkitsky Strait: Variability, forcing, and further pathways toward the western Arctic Ocean from a model and observations // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015. Vol. 120. P. 4925–4944. doi:10.1002/2014JC010635
19. *Glukhovets D.I., Goldin Y.A.* Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data // *Oceanologia*. 2020. Vol. 62. P. 364–373. doi:10.1016/j.oceano.2020.04.002
20. *Warner J.L., Screen J.A., Scaife A.A.* Links between Barents-Kara Sea ice and the extratropical atmospheric circulation explained by internal variability and tropical forcing // *Geophysical Research Letters*. 2019. P. 1–18. doi:10.1029/2019gl085679
21. *Kostianoy A.G., Nihoul J.C.J., Rodionov V.B.* Physical oceanography of the frontal zones in Sub-Arctic Seas. Elsevier Oceanography Series, 2004. 71 p.
22. *Ivshin V.A., Trofimov A.G., Titov O.V.* Barents Sea thermal frontal zones in 1960–2017: variability, weakening, shifting // *ICES Journal of Marine Science*. 2019. Vol. 76. P. i3–i9. doi:10.1093/icesjms/fsz159
23. *Liu Y., Minnett P.J.* Sampling errors in satellite-derived infrared sea-surface temperatures. Part I: Global and regional MODIS fields // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 177. P. 48–64. doi:10.1016/j.rse.2016.02.026
24. *Meissner T., Wentz F.J., Le Vine D.M.* The Salinity Retrieval Algorithms for the NASA Aquarius Version 5 and SMAP Version 3 Releases // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. P. 1121. doi:10.3390/rs10071121
25. *Ablain M. et al.* Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project // *Ocean Science*. 2015. Vol. 11. P. 67–82. doi:10.5194/os-11-67-2015
26. *Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E89-GHz channels // *Journal of Geophysical Research*. 2008. Vol. 113. P. C02S03. doi:10.1029/2005JC003384
27. *Climate Diagnostics Bulletin*. Climate Prediction Center. US Department of Commerce, 1999. 80 p.
28. *Barnston A.G., Livezey R.E.* Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Monthly Weather Review*. 1987. Vol. 115, N 6. P. 1083–1126. doi:10.1175/1520–0493(1987)115<1083:csapol>2.0.co;
29. *Gao N., Bueh C., Xie Z., Gong Y.A.* Novel Identification of the Polar/Eurasia Pattern and Its Weather Impact in May // *Journal of Meteorological Research*. 2019. Vol. 33, N 5. P. 810–825. doi:10.1007/s13351–019–9023-z

30. Кузин В.И., Лантева Н.А. Математическое моделирование стока основных рек Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 525–529.
31. Карклин В.П., Юлин А.В., Шаратунова М.В., Мочнова Л.П. Климатическая изменчивость ледяных массивов Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4. С. 37–46. doi:10.30758/0555-2648-2017-0-4-37-46
32. Yamanouchi T., Takata K. Rapid change of the Arctic Climate system and its global influences — Overview of GRENE Arctic Climate change research project (2011–2016) // Polar Science. 2020. P. 100548. doi:10.1016/j.polar.2020.100548

References

1. Pavlov V.K., Pfirman S.L. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 1995, 42, 6, 1369–1390. doi:10.1016/0967–0645(95)00046–1
2. Harms I.H., Karcher M.J. Modeling the seasonal variability of hydrography and circulation in the Kara Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999, 104, C6, 13431–13448. doi:10.1029/1999jc900048
3. Dobrovolsky A.D., Zalogin B.S. Seas of the USSR. *Moscow, MGU*, 1982. 192 p. (in Russian).
4. Oziel L., Sirven J., Gascard J.-C. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011). *Ocean Science*. 2016, 12, 1, 169–184. doi:10.5194/os-12–169–2016
5. Barton B.I., Lique C., Lenn Y.-D. Water mass properties derived from satellite observations in the Barents Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020, 125, e2019JC015449. doi:10.1029/2019JC015449
6. Bauch D., Cherniavskaia E. Water Mass Classification on a Highly Variable Arctic Shelf Region: Origin of Laptev Sea Water Masses and Implications for the Nutrient Budget. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018, 123, 3, 1896–1906. doi:10.1002/2017jc013524
7. Osadchiev A.A., Frey D.I., Shchuka S.A., Tilinina N.D., Morozov E.G., Zavalov P.O. Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020, 1–35. doi:10.1029/2020jc016486
8. Zatsepin A.G., Zavalov P.O., Kremenetskiy V.V., Poyarkov S.G., Soloviev D.M. Fresh surface layer in the Kara Sea. *Oceanology*. 2010, 50, 5, 643–656. doi:10.1134/S0001437010050024
9. Zavalov P.O., Izhitskiy A.S., Osadchiev A.A., Pelevin V.V., Grabovskiy A.B. The structure of thermohaline and bio-optical fields in the surface layer of the Kara Sea in September 2011. *Oceanology*. 2015, 55, 4, 461–471. doi:10.1134/s0001437015040177
10. 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, 176, 177–187. doi:10.1016/j.rse.2016.01.020
11. Polukhin A.A. The role of river runoff in the Kara Sea surface layer acidification and carbonate system changes. *Environmental Research Letters*. 2019, 14, 105007. doi:10.1088/1748–9326/ab421
12. Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Pedchenko A.P. Assessment of the variability of the river plums frontal zone in the Kara Sea on the basis of integration of satellite remote sensing data. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2021, 18, 2, 241–250 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2021-18-2-241-250
13. Holmes R.M., Peterson B.J., Zulidov V.V. et al. Nutrient chemistry of the Ob' and Yenisey Rivers, Siberia: Results from June 2000 expedition and evaluation of longterm data sets. *Marine Chemistry*. 2001, 75, 219–227. doi:10.1016/s0304–4203(01)00038-x
14. Fedorov K.N. The physical nature and structure of oceanic fronts. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1983. 296 p. (in Russian).
15. Atadzhanova O.A., Zimin A.V., Svergun E.I., Konik A.A. Submesoscale eddy structures and frontal dynamics in the Barents Sea. *Physical Oceanography*. 2018, 25, 3, 220–228. doi:10.22449/1573-160X-2018-3-220-228
16. Zhuk V.R., Kubryakov A.A. Interannual variability of the Lena River plume propagation in 1993–2020 during the ice-free period on the base of satellite salinity, temperature, and altimetry measurements. *Remote Sensing*. 2021, 13, 21, 4252, 1–20. doi:10.3390/rs13214252
17. Supply A., Boutin J., Vergely J.-L., Kolodziejczyk N., Reverdin G., Reul N., Tarasenko A. New insights into SMOS sea surface salinity retrievals in the Arctic Ocean. *Remote Sensing of Environment*. 2020, 249, 112027. doi:10.1016/j.rse.2020.112027
18. Janout M.A. et al. Kara Sea freshwater transport through Vilkitsky Strait: Variability, forcing, and further pathways toward the western Arctic Ocean from a model and observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015, 120, 4925–4944. doi:10.1002/2014JC010635
19. Glukhovets D.I., Goldin Y.A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data. *Oceanologia*. 2020, 62, 364–373. doi:10.1016/j.oceano.2020.04.002
20. Warner J.L., Screen J.A., Scaife A.A. Links between Barents-Kara Sea ice and the extratropical atmospheric circulation explained by internal variability and tropical forcing. *Geophysical Research Letters*. 2019, 1–18. doi:10.1029/2019gl085679

**Пространственно-временная изменчивость характеристик стоковой фронтальной зоны в Карском море...
Spatial and temporal variability of the characteristics of the river plume frontal zone in the Kara Sea...**

21. Kostianoy A.G., Nihoul J.C.J., Rodionov V.B. Physical oceanography of the frontal zones in Sub-Arctic Seas. *Elsevier Oceanography Series*, 2004. 71 p.
22. Ivshin V.A., Trofimov A.G., Titov O.V. Barents Sea thermal frontal zones in 1960–2017: variability, weakening, shifting. *ICES Journal of Marine Science*. 2019, 76, i3–i9. doi:10.1093/icesjms/fsz159
23. Liu Y., Minnett P.J. Sampling errors in satellite-derived infrared sea-surface temperatures. Part I: Global and regional MODIS fields. *Remote Sensing of Environment*. 2016, 177, 48–64. doi:10.1016/j.rse.2016.02.026
24. Meissner T., Wentz F.J., and Le Vine D.M. The salinity retrieval algorithms for the NASA Aquarius Version 5 and SMAP Version 3 releases. *Remote Sensing*. 2018, 10, 1121. doi:10.3390/rs10071121
25. Ablain M. et al. Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project. *Ocean Science*. 2015, 11, 67–82. doi:10.5194/os-11-67-2015
26. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E89-GHz channels. *Journal of Geophysical Research*. 2008, 113, C02S03. doi:10.1029/2005JC003384
27. Climate Diagnostics Bulletin. Climate Prediction Center. *US Department of Commerce*, 1999. 80 p.
28. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*. 1987, 115, 6, 1083–1126. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:csapol>2.0.co;
29. Gao N., Bueh C., Xie Z., Gong Y.A. Novel identification of the Polar/Eurasia pattern and its weather impact in May. *Journal of Meteorological Research*. 2019, 33, 5, 810–825. doi:10.1007/s13351-019-9023-z
30. Kuzin V.I., Lapteva N.A. Mathematical simulation of runoff of main Siberian rivers. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2014, 27, 6, 525–529 (in Russian).
31. Karklin V.O., Yulin A.V., Sharatunova M.V., Mochnova L.P. Climate variability of the Kara Sea ice massifs. *Arctic and Antarctic Research*. 2017, 4, 37–46 (in Russian). doi:10.30758/0555-2648-2017-0-4-37-46
32. Yamanouchi T., Takata K. Rapid change of the Arctic climate system and its global influences — Overview of GRENE Arctic climate change research project (2011–2016). *Polar Science*. 2020, 100548. doi:10.1016/j.polar.2020.100548

Об авторах

КОНИК Александр Александрович, РИНЦ AuthorID: 950834, ORCID: 0000-0002-2089-158X, Scopus AuthorID: 57203864647, e-mail: konikrshu@gmail.com

ЗИМИН Алексей Вадимович, РИНЦ AuthorID: 124451, ORCID: 0000-0003-1662-6385, Scopus AuthorID: 55032301400, WoS ResearcherID: C-5885–2014, e-mail: zimin2@mail.ru

АТАДЖАНОВА Оксана Алишеровна, РИНЦ AuthorID: 846708, ORCID: 0000-0001-6820-0533, e-mail: oksana.atadzhanova@gmail.com