

Пространственно-временная изменчивость характеристик Арктической фронтальной зоны в Баренцевом и Карском морях в летний период в первые два десятилетия XXI века

А. А. Коник^{1, 2} ✉, А. В. Зимин^{1, 2}

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

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ konikrshu@gmail.com

Поступила в редакцию 05.04.22; одобрена после рецензирования 28.05.2022;
принята к публикации 09.09.2022.

Аннотация

Цель. Цель работы – по результатам дистанционных методов зондирования Земли изучить многолетнюю изменчивость характеристик поверхностных проявлений Арктической фронтальной зоны, сезонно формирующейся в прикромочной ледовой зоне арктических морей.

Методы и результаты. В качестве исходных данных для выделения фронтальной зоны в работе выступают спутниковые измерения поверхностной температуры MODIS/Aqua и VIIRS/Suomi NPP с августа по сентябрь 2002–2020 гг. Положение и характеристики Арктической фронтальной зоны определялись с помощью кластерного анализа. Установлено, что в теплый период года средний многолетний термический поверхностный градиент Арктической фронтальной зоны составляет 0,06 °С/км, а площадь – 348 тыс. км². Изменчивость межгодовых оценок градиента в области Арктической фронтальной зоны составила от 0,04 до 0,09 °С/км, а площади – от 159 до 489 тыс. км².

Выводы. Пространственное положение фронтальной зоны в последние два десятилетия характеризуется значительным смещением на север в область 81–82° с. ш. Поверхностная температура в области фронтального раздела в последнее десятилетие в среднем выше, чем в предыдущее. Такая динамика определяется отступлением кромки арктического ледяного покрова. Максимальные величины термического градиента в области Арктической фронтальной зоны зафиксированы в 2009, 2016 и 2018 гг. при значительных скоростях приводного ветра и пониженной сплоченности ледяного покрова. Показано, что поверхностная температура, термический градиент и площадь фронтальной зоны определяются площадью и сплоченностью льдов в прошлогодний осенний сезон. Установлено, что зимний индекс NAO частично обуславливает изменение поверхностной температуры в Арктической фронтальной зоне в теплый сезон.

Ключевые слова: Арктическая зона, фронтальная зона, прикромочная ледовая зона, ледяной покров, спутниковые измерения, NAO, Баренцево море, Карское море

Благодарности: данная работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-35-90053 и государственного задания ИО РАН FMWE-2021-0014.

Для цитирования: Коник А. А., Зимин А. В. Пространственно-временная изменчивость характеристик Арктической фронтальной зоны в Баренцевом и Карском морях в летний период в первые два десятилетия XXI века // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 6. С. 679–693. EDN BSJBNO. doi:10.22449/0233-7584-2022-6-679-693

Variability of the Arctic Frontal Zone Characteristics in the Barents and Kara Seas in the First Two Decades of the XXI Century

A. A. Konik^{1,2}✉, A. V. Zimin^{1,2}

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

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

✉ konikrshu@gmail.com

Abstract

Purpose. The article is devoted to studying the long-term variability of the characteristics of surface manifestations of the Arctic Frontal Zone formed seasonally in the Marginal Ice Zone of the Arctic seas.

Methods and Results. To identify the frontal zone, the satellite measurements of surface temperature carried out by the MODIS/Aqua and VIIRS/Suomi NPP from August to September, 2002–2020 are used as an initial data. The Arctic Frontal Zone position and characteristics were determined using the cluster analysis. In the warm period of a year, the average long-term thermal surface gradient in the Arctic Frontal Zone is revealed to be 0.06 °C/km, and its area – 348,000 km². Variability of the inter-annual gradient estimates in this region ranged from 0.04 to 0.09 °C/km, and the area – from 159,000 to 489,000 km².

Conclusions. During the last two decades, spatial position of the frontal zone has been characterized by a significant shift to the north (81–82° N). The surface temperature in the frontal zone in the last decade was on average higher than that in the previous one. Such dynamics is conditioned by retreat of the arctic ice cover edge. The thermal gradient maximum values in the Arctic Frontal Zone were recorded in 2009, 2016 and 2018 at the significant near-surface wind speeds and the reduced ice cover concentration. The surface temperature, the thermal gradient and the frontal zone area are shown to be conditioned by the ice area and concentration in last year's autumn season. It is established that during a warm season, the North Atlantic Oscillation winter index governs variation of the surface temperature in the Arctic Frontal Zone.

Keywords: Arctic zone, frontal zone, marginal ice zone, ice cover, satellite measurements, NAO, Barents Sea, Kara Sea

Acknowledgements: the study was carried out within the framework of the RFBR grant No. 20–35–90053 and state assignment of IO RAS on theme FMWE–2021–0014.

For citation: Konik, A.A. and Zimin, A.V., 2022. Variability of the Arctic Frontal Zone Characteristics in the Barents and Kara Seas in the First Two Decades of the XXI Century. *Physical Oceanography*, 29(6), pp. 659–673. doi:10.22449/1573-160X-2022-6-659-673

1. Введение

Арктический ледяной покров является одной из важнейших характеристик полярных регионов. Характеристики и пространственная динамика льдов влияют как на региональные особенности отдельных морей [1], так и на всю климатическую систему Арктики [2]. В последние десятилетия в Арктическом регионе наблюдается интенсивное отступление кромки ледяного покрова к Северному полюсу [3, 4]. На границе однолетнего льда и полностью открытых морских вод формируется уникальная по своей гидрологической структуре прикромочная ледовая зона (ПЛЗ) (работы¹ и [5–9]). Процессы взаимодействия океана и атмосферы с морским льдом в ПЛЗ усиливают мелкомасштабную

¹ Никифоров Е. Г., Шнайхер А. О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л. : Гидрометеиздат, 1980. 270 с. ; Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 1. Баренцево море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Л. : Гидрометеиздат, 1990. 280 с.

турбулентность и конвективное перемешивание [5, 6], а также влияют на различные морские пищевые цепи [10, 11].

Многочисленные исследования ПЛЗ [10–16] показали, что в результате взаимодействия относительно холодных распресненных вод вблизи кромки ледяного покрова и более теплых и отдаленных от кромки морских вод формируется фронтальная зона [13]. До настоящего времени у этой зоны нет установившегося наименования. Известно, что в некоторых исследованиях ее называют Арктической [12, 13], Прикромочной [17] либо фронтальной зоной ПЛЗ [15]. В данной статье авторы будут опираться на терминологию работы [13] и использовать термин «Арктическая фронтальная зона» (АФЗ).

Методические сложности контактных и дистанционных наблюдений в области АФЗ обуславливают отсутствие каких-либо сведений о многолетней изменчивости количественных оценок и ее динамики в Баренцевом и Карском морях. Из отдельных работ [13, 17] известно, что в Баренцевом море АФЗ, по данным судовых измерений, обладает сложной сезонной и межгодовой пространственной динамикой, которая зависит от характеристик и положения кромки ледяного покрова, а также параметров приповерхностного ветра. В теплый период года АФЗ в Баренцевом море [16, 17] характеризуется ярко выраженными вертикальными и горизонтальными термохалинными градиентами. В Карском море в последних исследованиях [14, 17] с помощью данных спутникового зондирования радиометров высокого разрешения описана пространственная динамика АФЗ и получены некоторые сезонные оценки термических градиентов и ширины этой зоны.

Однако весьма редкие и отрывочные исследования не позволяют на продолжительном интервале времени описать пространственную динамику и систематизировать количественные оценки характеристик АФЗ в Баренцевом и Карском морях. Получение и уточнение этих данных является важным аспектом в понимании происходящих глобальных климатических изменений. Не менее актуальным является исследование связи характеристик АФЗ и крупномасштабной атмосферной циркуляции, что позволит выявить особенности процесса взаимодействия океан – атмосфера в северных частях арктических морей.

Таким образом, цель настоящего исследования – детектирование АФЗ на поверхности, изучение ее межгодовой изменчивости и анализ оценок ее связи с региональными и глобальными гидрометеорологическими процессами.

2. Данные и методы

Пространственная изменчивость и количественные характеристики АФЗ оценивались с помощью среднемесячных спутниковых измерений температуры поверхности моря (ТПМ) с августа по сентябрь с 2002 по 2020 г. Для идентификации АФЗ использовались данные спутников с инфракрасными радиометрами высокого разрешения *MODIS/Aqua* и *VIIRS/Suomi NPP*. Пространственное разрешение данных составляет $0,05^\circ$ по широте и долготе [18].

Характеристики и положение АФЗ определялись при помощи совместного анализа полей ТПМ и ее градиентов. Термические горизонтальные градиенты рассчитывались согласно методике, представленной в работе [19]. В программном обеспечении *Matlab* создавалась двумерная сетка с координатами от

75° до 83° с. ш. и 30° до 90° в. д. в Баренцевом и Карском морях с шагом 0,25° по широте и долготе. Затем полученные данные о ТПМ и ее градиентах объединялись в единую матрицу и интерполировались на указанную сетку.

АФЗ на поверхности Баренцева и Карского морей идентифицировалась в программе *Statistica 10* с помощью иерархического и интерактивного алгоритмов кластерного анализа ² в два этапа. На первом этапе определялось оптимальное количество классов с помощью построенных дендрограмм методом Уорда с евклидовой метрикой. На втором этапе проводилась окончательная кластеризация методом *k-means*. По результатам кластерного анализа строились карты распределения выделенных положений АФЗ. Карты положений основных классов вод анализировались за каждый отдельный месяц. Для подкласса, соответствующего АФЗ, на месячном и годовом интервалах рассчитывались средние значения ТПМ, ее градиентов, площади, а также определялись координаты самой северной точки фронтальной зоны. Далее на основе полученных координат по десятилетиям оценивалась повторяемость широт, на которых регистрировалась северная граница АФЗ.

Для анализа влияния ветра на параметры АФЗ использовались 6-часовые данные о скорости приводного ветра продукта *ERA-Interim Reanalysis*, полученные с сайта <https://www.ecmwf.int> от *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*. Данные о полях ветра были получены за период с 2002 по 2019 г. и усреднены до месячных значений. Площадь и сплоченность (в исходных данных используется термин «концентрация», или *concentration*) ледяного покрова в районе исследования описывались с помощью данных спутниковых радиометров *AMSR-E* и *AMSR-2*. Данные были подготовлены Бременским университетом [20]. По ним также определялось положение кромки ледяного покрова (на представленных в работе картах это линии, где сплоченность льда составляла 1 %) и площадь льдов с разной сплоченностью.

Анализ влияния глобальных атмосферных процессов на изменение параметров АФЗ проводился с привлечением индекса атмосферной циркуляции *NAO (North Atlantic Oscillation)* ³, который отражает интенсивность зонального переноса воздушных масс над северной частью Атлантического океана [21]. Данные загружались с сайта *Climate Prediction Centre* (URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>).

Для определения степени связи региональных и глобальных процессов с характеристиками АФЗ использовался кросскорреляционный анализ. Характеристики фронтальной зоны сопоставлялись с данными о ветре, площади и сплоченности ледяного покрова на месячном интервале со сдвигом до 12 месяцев. Данные об индексах атмосферной циркуляции коррелировались со средними сезонными оценками характеристик фронтальной зоны на временном интервале от 3 до 9 месяцев. Полученные коэффициенты проходили проверку значимости с помощью критерия Стьюдента для уровня значимости 95 %.

² Вайновский П. А., Малинин В. Н. Методы обработки и анализа океанологической информации: Многомерный анализ. СПб. : РГТМИ, 1992. 96 с.

³ URL: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/CDB/CDB_Archive_html/bulletin_0299/telemonc.gif (дата обращения: 20.11.2022).

3. Результаты исследования

3.1. Детектирование АФЗ на поверхности Баренцева и Карского морей.

На примере результатов кластеризации полей температуры и ее градиента методом Уорда, представленном на рис. 1, *a*, можно увидеть два основных класса, которые располагаются довольно далеко друг от друга. Данные классы можно отнести к чистым морским водам и водам в области арктического ледяного покрова. Уменьшая пороговое расстояние более чем в три раза, можно наблюдать разделение класса морских вод на два подкласса. Согласно общим представлениям о характеристиках вод Баренцева и Карского морей (см. работы ⁴ и [22–24]), известно, что в рассматриваемом регионе наблюдается арктическая водная масса. В ходе различных исследований [13, 14, 16] было установлено, что между водами, формирующимися под непосредственным влиянием кромки ледяного покрова, и арктическими водами в данном регионе возникают фронтальные зоны разного генезиса. Соответственно, результаты кластеризации методом Уорда позволяют сделать предположение о наличии в поверхностном слое двух модификаций морских вод и отдельного класса вод в области дрейфующего ледяного покрова. В результате в данном регионе наиболее оптимально с физической и статистической точки зрения будет выделение трех классов вод.

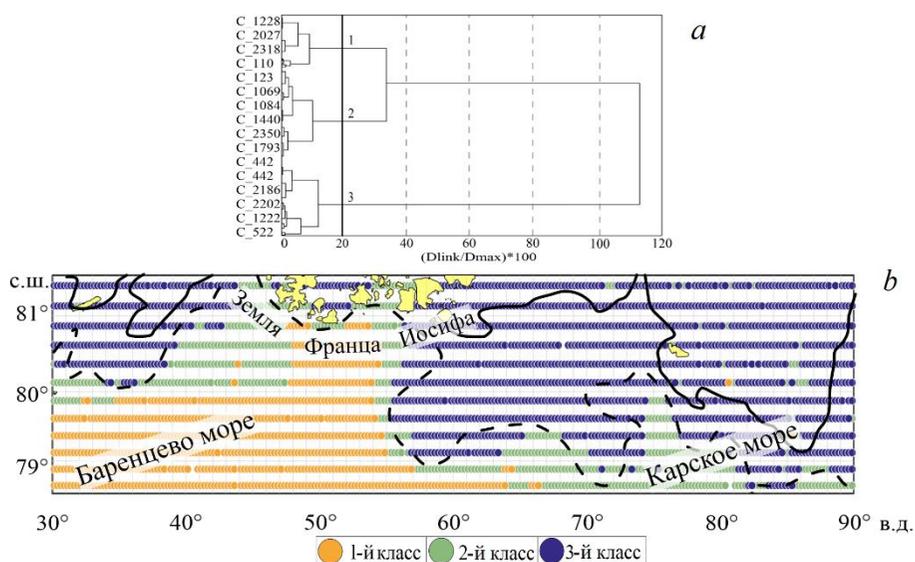


Рис. 1. Результаты кластерного анализа и использования характеристик льда по спутниковым данным в августе 2002 г.: *a* – дендрограмма, полученная методом Уорда (черной вертикальной линией и цифрами обозначены основные классы вод); *b* – классификация, полученная методом *k*-средних (1-й класс – арктическая водная масса; 2-й класс – АФЗ; 3-й класс – воды в области ледяного покрова; черная штриховая линия – среднемесячное положение кромки ледяного покрова (сплоченность 1 %); черная сплошная линия – граница льдов со сплоченностью 20 %)

Fig. 1. Results of the cluster analysis and application of the satellite-derived ice parameters in August, 2002: *a* – dendrogram obtained by the Ward's method (black vertical line and numbers denote the water main classes); *b* – classification obtained by the *k*-means method (class 1 – arctic water mass; class 2 – AFZ; class 3 – waters in the ice cover area; black hatch line – the monthly average position of the ice cover edge (1 % ice concentration); black solid line – boundary of the ice with 20 % ice concentration)

⁴ Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М.: МГУ, 1982. 192 с.
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 38 № 6 2022

Полученное количество классов использовалось при кластеризации методом *k-means*, результаты применения которого изображены на рис. 1, *b*.

Количественные оценки полученной кластеризации представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что классификация позволяет четко соотнести полученные классы с водами разного генезиса, которые наблюдаются в выбранном регионе исследования.

Т а б л и ц а 1
Table 1

Количественные оценки характеристик ТПМ (\bar{T}), ее градиентов ($\nabla\bar{T}$) и площади АФЗ (s) по результатам кластеризации в августе 2002 г.
Quantitative estimates of SST characteristics (T), its gradients (∇T) and AFZ area (s) based on the cluster analysis results for August, 2002

Класс / Class	\bar{T} , °C	$\nabla\bar{T}$, °C/км / $\nabla\bar{T}$, °C/km	$s \cdot 10^3$, км ² / $s \cdot 10^3$, km ²
1	2,6	0,03	272
2	1,8	0,06	263
3	-0,2	0,04	641

Согласно исследованиям (работы ⁵ и [9, 23–26]), арктические воды в Баренцевом и Карском морях чаще всего отмечаются выше 77–79° с. ш. и располагаются вблизи арх. Шпицберген, Земли Франца Иосифа (ЗФИ) и кромки ледяного покрова. Положение первого класса (см. рис. 1, *b*) в целом соответствует климатическому положению данной водной массы, описанному в работах ⁶ и [23, 25]. Средняя температура арктических вод в теплый сезон в среднем составляет 2–3 °C, что в целом совпадает с результатами проведенной кластеризации (см. табл. 1).

Второй класс занимает пограничное положение между арктическими водами и сезонными (тающими) льдами (сплоченность более 1 %). Северная граница класса почти на всем своем протяжении соприкасается с кромкой ледяного покрова. Такое пространственное положение класса сопоставимо с ранее описанным положением [13] АФЗ на границе льда в ПЛЗ. У данного класса наблюдается максимальный поверхностный термический градиент (0,06 °C/км) что, согласно классификации ⁷, позволяет отнести его к фронтальной зоне. Дополнительным подтверждением отнесения данного класса к фронтальной зоне служит его минимальная площадь (263 тыс. км²) по сравнению с площадью, которую занимают другие классы. Кроме этого, результаты экспедиционных

⁵ Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. 192 с.; Вайновский П. А., Малинин В. Н. Методы обработки и анализа океанологической информации: Многомерный анализ. 96 с.

⁶ Никифоров Е. Г., Шнайхер А. О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. 270 с.; Вайновский П. А., Малинин В. Н. Методы обработки и анализа океанологической информации: Многомерный анализ. 96 с.

⁷ Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л., 1983. 296 с.

исследований [16] соотносятся с полученной величиной термического градиента фронтальной зоны, который был выделен на границе ПЛЗ. Исходя из проведенного анализа, данный класс можно отнести к АФЗ.

Анализ данных радиометра *AMSR-E* за август 2002 г. показал, что в области 3-го класса максимальную площадь (более 340 тыс. км²) занимают воды с ледяными полями со сплоченностью более 1 %. Полученные в результате кластеризации количественные оценки ТПМ (преимущественно отрицательные значения) также подтверждают, что данный класс относится к водам в области сезонных ледяных полей (см. табл. 1). Важно отметить, что отрицательные температуры, сходные с температурой поверхностных вод, также формируются на отдельных открытых участках тонкого льда вблизи проталин.

Таким образом, в рамках проведенной кластеризации в исследуемой области Баренцева и Карского морей удалось выделить три класса: арктические воды, АФЗ и воды в области сезонных ледяных полей.

3.2. Многолетняя и межгодовая изменчивость АФЗ. Выполнение кластерного анализа дало возможность получить многолетние количественные оценки и описать динамику изменчивости АФЗ с 2002 по 2020 г. В табл. 2 представлены осредненные многолетние параметры АФЗ за август и сентябрь.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Средние многолетние оценки ТПМ (\bar{T}), ее градиентов ($\nabla\bar{T}$) и площади АФЗ (s) за август и сентябрь
Average long-term estimates of SST (\bar{T}), its gradients ($\nabla\bar{T}$) and the AFZ area (s) for August and September

Месяц / Month	\bar{T} , °C	$\nabla\bar{T}$, °C/км / $\nabla\bar{T}$, °C/km	$s \cdot 10^3$, км ² / $s \cdot 10^3$, км ²
Август / August	1,2	0,06	364
Сентябрь / September	0,8		332
Среднее / Average	1.0	0,06	348

Многолетние оценки ТПМ за каждый месяц отражают ход с максимумом в августе и минимумом в сентябре. Величина термического градиента в августе и сентябре остается неизменной. Максимум площади поверхностной АФЗ регистрируется в августе, а затем наблюдается незначительный спад ее величины.

Анализ многолетней пространственной динамики АФЗ (рис. 2, *a – b*) показал, что в августе фронтальная зона располагается в районах от 78°–80° с. ш., находясь при этом южнее арх. ЗФИ. В сентябре АФЗ, разделяясь на две обособленные части, смещается в область 80°–81° с. ш. Вероятно, основной вклад

в изменчивость пространственного положения фронтальной зоны в данный период года вносит интенсивность солнечной радиации, воздействующей на таяние и отход кромки ледяного покрова на север.

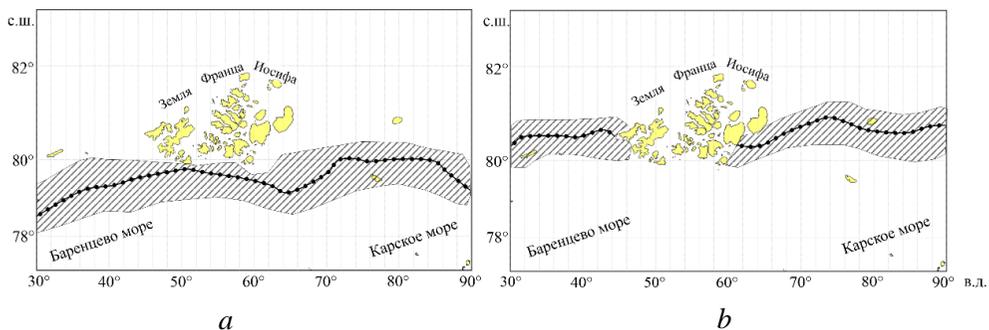


Рис. 2. Многолетние положения АФЗ (область штриховых линий): *a* – в августе; *b* – в сентябре. Черной линией указано положение кромки ледяного покрова (сплоченность льда 1 % по данным радиометров AMSR-E и AMSR-2)

Fig. 2. Long-term AFZ positions (hatch lines area): *a* – August; *b* – September. Black line indicates position of the ice cover edge (1 % ice concentration based on the AMSR-E and AMSR-2 radiometers data)

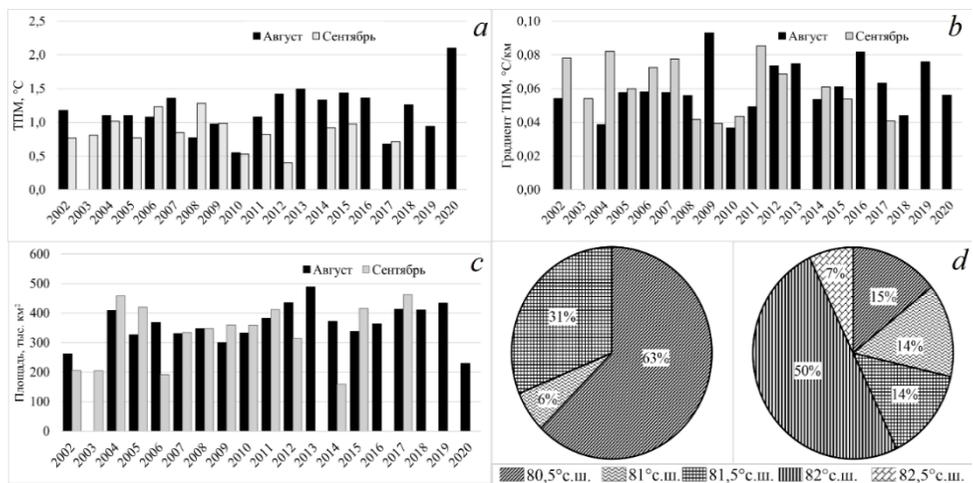


Рис. 3. Межгодовая изменчивость с 2002 по 2020 г. ТПМ (*a*), градиента ТПМ (*b*), площади АФЗ (*c*), повторяемости координат северной границы зоны с 2002 по 2010 г. (*d*) и с 2011 по 2020 г. (*e*)

Fig. 3. Interannual variability (2002–2020) of SST (*a*), SST gradient (*b*), AFZ area (*c*) and repeatability of the coordinates of the zone northern boundary in 2002–2010 (*d*) and in 2011–2020 (*e*)

Межгодовая изменчивость характеристик температуры во фронтальной зоне за весь период исследования представлена на рис. 3, *a*. Видно, что с 2002 по 2020 г. ТПМ колеблется от 0,4 °C в сентябре до 2,1 °C в августе. Чаще всего максимум поверхностной температуры наблюдается в августе, а минимум – в сентябре. В период с 2002 по 2012 г. ТПМ в АФЗ значительно не изменялась, а максимальные значения достигали 1,4 °C, что в целом совпадает со средними многолетними оценками (см. табл. 2). Во вторую декаду XXI в. наблюдается

положительный тренд поверхностной температуры, максимум которого отмечается в августе 2020 г. и составляет $2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, что в два раза выше средних оценок (см. табл. 2). Важно сразу отметить, что в последние годы АФЗ в рассматриваемом регионе регистрируется только в августе.

Изменчивость величины градиента АФЗ с 2002 по 2020 гг. (рис. 3, *b*) в целом характеризуется однородностью. Термический градиент в АФЗ меняется от $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ в 2010 г. до $0,09\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ в 2009 г. В первую декаду XXI в. величина градиента ТПМ почти не меняется и в общем соответствует его средним многолетним значениям (см. табл. 2). Однако с 2011 по 2020 г. наблюдается небольшой рост термического градиента с максимумом $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ в сентябре 2016 г. Стоит отметить, что в отдельные месяцы, например в августе 2009, 2016, 2019 гг., при небольших значениях ТПМ наблюдаются максимумы градиента ТПМ в АФЗ. Однако данные случаи являются исключительными и не распространяются на весь период исследования.

Параметры площади АФЗ (рис. 3, *c*) характеризуются минимальным значением в сентябре 2014 г. (139 тыс. км^2) и максимумом в августе 2013 г. (489 тыс. км^2). Межгодовая изменчивость площади отличается незначительными колебаниями в первое десятилетие XXI в. (амплитуда $30\text{--}40\text{ тыс. км}^2$), а с 2010 по 2020 г. ее диапазон возрастает в несколько раз (амплитуда более 330 тыс. км^2). В некоторые годы наблюдаются как положительные (2004, 2013, 2017 гг.), так и отрицательные (2006, 2014, 2020 гг.) аномалии площади АФЗ, величина которых значительно превышает средние многолетние оценки (см. табл. 2). Стоит также отметить циклы роста (2008–2012 гг.; 2016–2019 гг.) и спада (2004–2007 гг.; 2013–2015 гг.) величины площади, интервал которых составляет от 3 до 4 лет.

Анализ диаграмм повторяемости широты северной границы АФЗ за 20 лет (рис. 3, *d – e*), показал, что в первое десятилетие фронтальная зона наблюдалась в южных районах арх. ЗФИ ($80,5^{\circ}\text{--}81,5^{\circ}$ с. ш.), а во второе чаще стала наблюдаться гораздо севернее, в области до $82,5^{\circ}$ с. ш. Важно отметить, что с 2010 по 2020 г. увеличился процент встречаемости северной границы фронтальной зоны в более высоких широтах. Такое пространственное положение фронтальной зоны является основной причиной отсутствия ее количественных оценок в сентябре в последние годы. АФЗ, как и арктический ледяной покров, значительно смещается на север и выходит далеко за пределы географических границ Баренцева и Карского морей.

3.3. Связь АФЗ с региональными и глобальными гидрометеорологическими процессами. Оценки характеристик площади и сплоченности ледяного покрова, а также характеристик приводного ветра за исследуемый период на рассматриваемой акватории представлены на рис. 4. Параметры площади и сплоченности ледяного покрова за рассматриваемый период имеют ярко выраженный отрицательный временной тренд. При этом минимальные оценки чаще фиксировались в отдельные годы второго десятилетия XXI в. (2012 г. – 117 тыс. км^2 и 5% , 2013 г. – 52 тыс. км^2 и 4% , 2018 г. – 110 тыс. км^2 и 3% , 2020 г. – 53 тыс. км^2 и 4%). Стоит отметить, что площадь льдов в области изучаемого региона за первые два десятилетия XXI в. в среднем сократилась на $200\text{--}250\text{ тыс. км}^2$, а их сплоченность снизилась более чем в два раза с 16 до

6 %. Интенсификация ветрового воздействия чаще наблюдалась с 2002 по 2010 г.: максимумы наблюдаются в 2006 (2,9 м/с) и 2009 гг. (3,5 м/с). Во второй декаде XXI в. скорость ветра упала, в последние годы наблюдается ее устойчивое уменьшение (2018 – 1,2 м/с, 2019 – 0,8 м/с). Важно отметить, что в последние годы (с 2016 по 2019 г.) параметры ледяного покрова и средней скорости ветра изменяются синхронно.

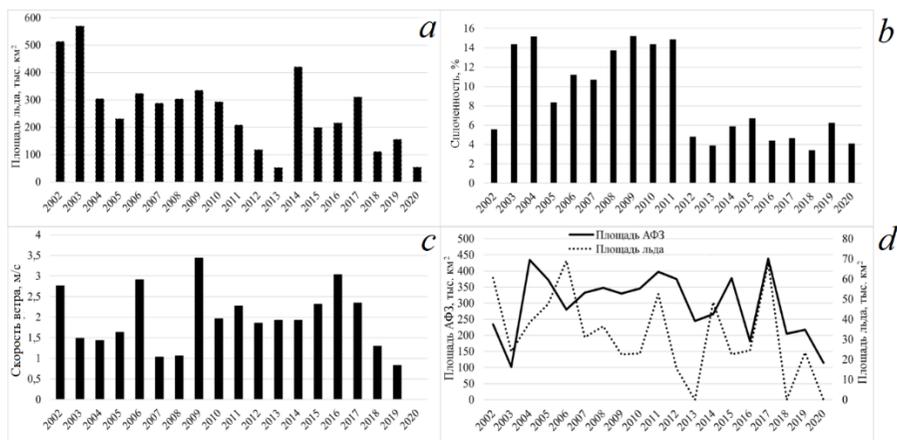


Рис. 4. Межгодовые оценки параметров морского льда за август и сентябрь с 2002 по 2020 г.: *a* – площадь льда со сплоченностью от 1 до 100 %; *b* – средняя сплоченность льда в районе исследования; *c* – скорость приводного ветра; *d* – среднесезонная величина площади АФЗ и площади льдов со сплоченностью от 1 до 20 %

Fig. 4. Interannual estimates of the sea ice parameters for August and September, 2002–2020: *a* – ice cover area with a concentration from 1 to 100 %; *b* – average ice concentration in the region under study; *c* – near-surface wind speed; *d* – seasonal average values of the AFZ area and the ice cover one with a concentration from 1 to 20 %

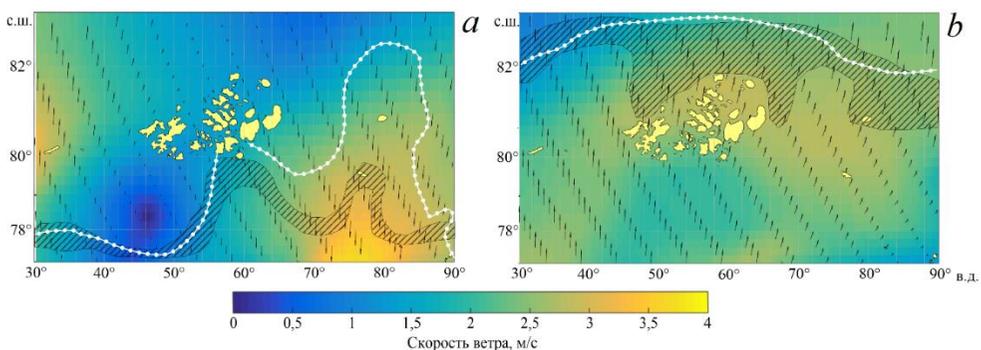
Сопоставление межгодовых параметров льда и ветра с характеристиками АФЗ показало, что общий рост поверхностной температуры во фронтальной зоне (см. рис. 3, *a*) за отдельные годы (2015, 2016, 2018, 2020 гг.) формируется на фоне малой величины скорости приводного ветра, а также понижения площади и сплоченности ледяного покрова. Большинство малых значений ТПМ в АФЗ (2002, 2003, 2007, 2009 гг.) совпадает с большой величиной площади и сплоченности льдов и максимальной скоростью ветра в регионе. Исключением является 2012 г., когда при средней скорости ветра не более 2 м/с наблюдаются минимальные значения ТПМ (0,4 °С) и малая величина площади и сплоченности льдов. Вероятно, в начале второго десятилетия XXI в. интенсивное таяние льдов не могло иметь одномоментный отклик в изменении поверхностной температуры АФЗ. Однако постоянное увеличение открытой от льдов морской поверхности на фоне малых скоростей ветра, по-видимому, повлияло на интенсификацию радиационного прогрева и формирование значительных положительных аномалий ТПМ в АФЗ, например, в августе 2020 г.

Большая величина термического градиента АФЗ (см. рис. 3, *b*), зафиксированная в 2009, 2016 и 2018 гг., наблюдается при относительно высоких ско-

ростях приводного ветра и минимумах площади и сплоченности ледяного покрова. Возрастание градиента, вероятно, возникает в результате увеличенного поступления холодных распресненных вод в область вне ледовой зоны вследствие таяния льдов. Таяние ускоряется из-за увеличения скорости приводного ветра. Малая величина градиентов ТПМ в сентябре 2008 и августе – сентябре 2010 гг. соответствует небольшой скорости ветра и периодам максимумов площади и сплоченности льдов, что указывает на связь характеристик градиента АФЗ с объемом поступающих в результате таяния вод.

Максимальные значения площади АФЗ (2012, 2013, 2017, 2019) совпадают с периодами, когда отмечаются небольшие скорости ветра и минимумы площади и сплоченности ледяного покрова. В годы увеличенной площади и сплоченности льдов (2002, 2003, 2006, 2014 гг.), а также усиления ветра (2009, 2016 гг.) наблюдаются минимальные площади, занимаемые АФЗ. Сравнение площади АФЗ и площади льдов со сплоченностью не более 20 % в рассматриваемом регионе (рис. 4, *d*) показало их почти синхронную изменчивость. Такая взаимозависимость позволяет предположить, что интенсивность таяния льдов вносит значительный вклад в формирование площади АФЗ. Единственное исключение (ресинхронизация) регистрируется в 2006 г., когда при уменьшении площади АФЗ наблюдается рост площади льда с низкой сплоченностью, что, вероятно, связано с интенсификацией скорости приводного ветра северных румбов в этот период (рис. 4, *a – c*), который повлиял на увеличение объема выносимых льдов из северных районов Арктики.

Роль ветра в изменении характеристик фронтальной зоны хорошо иллюстрирует рис. 5. Максимальная площадь АФЗ (рис. 5, *a*), которая отмечается в августе 2013 г., наблюдается при северных ветрах со средней скоростью до 3,5 м/с. В сентябре 2014 г. при ветрах южных румбов со средней скоростью более 4 м/с регистрируется минимальная площадь АФЗ (рис. 5, *b*).



Р и с. 5. Минимальная (сентябрь 2014 г.) (*a*) и максимальная (август 2013 г.) (*b*) площадь распространения АФЗ в различных ветровых условиях. Белая линия показывает положение края ледяного покрова

F i g. 5. Minimum (September, 2014) (*a*) and maximum (August, 2013) (*b*) areas of the AFZ propagation at various wind conditions. White line indicates the position of the ice cover edge

Корреляционный анализ параметров льда и АФЗ показал, что сплоченность льдов в исследуемом регионе за октябрь прошлого года имеет значимый коэффициент корреляции с градиентом ТПМ в августе ($r = -0,44$) и площадью МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 38 № 6 2022 689

АФЗ в сентябре ($r = 0,47$). Кроме этого, площадь льдов в октябре прошлого года коррелирует с сентябрьскими значениями ТПМ в АФЗ ($r = 0,54$). Возможная причина таких взаимосвязей лежит в величине теплозапаса вод, образовавшихся в высоких широтах в течение теплого сезона. В результате в следующий летний сезон по мере таяния льдов величина объема освобожденного тепла может влиять на ослабление градиента в области фронтальной зоны в период ее формирования в августе, а потом в сентябре сказываться на повышении ТПМ и площади АФЗ.

Для анализа влияния глобальных атмосферных переносов на параметры АФЗ были привлечены индексы *NAO*, межгодовой ход которых представлен на рис. 6.

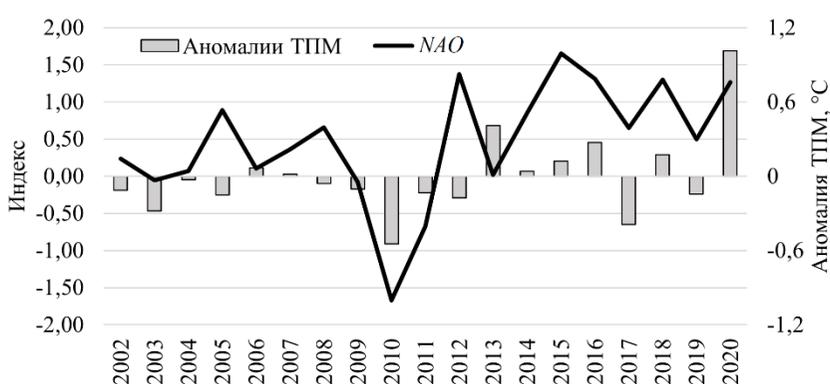


Рис. 6. Межгодовая динамика осредненных индексов атмосферной циркуляции *NAO* за зимний сезон и аномалий ТПМ (отличие от среднего значения ТПМ в районе АФЗ за весь период исследований) в АФЗ за август и сентябрь

Fig. 6. Interannual dynamics of the averaged *NAO* indices in the winter season and the SST anomalies (differing from the SST average value in AFZ for the entire period under study) in AFZ for August and September

Колебания *NAO* в большинство лет характеризуются положительными значениями. Важно отметить, что значения индекса *NAO* с 2011 по 2020 г. увеличились почти в два раза по сравнению с первым десятилетием XXI в. Такой значительный рост индекса в последние годы показывает усиление зонального переноса теплого воздуха из северной части Атлантического океана в рассматриваемую область Баренцева и Карского морей.

Стоит обратить внимание, что положительные значения *NAO* фиксируются в периоды малых термических аномалий. Корреляционный анализ зимних значений индекса *NAO* и текущих летних величин ТПМ в АФЗ показал, что между ними существует значимая статистическая связь ($r = 0,50$). Вероятно, при интенсификации зонального переноса с запада на восток в зимний сезон происходит усиление переноса вод из северной Атлантики в Арктику. Эти процессы влияют на температуру вод у кромки льдов в теплый сезон, что может увеличивать ТПМ в АФЗ. Отметим, что полученные абсолютные значения коэффициентов корреляции, хоть их величина и мала, показывают важность глобальных переносов в формировании АФЗ.

4. Заключение

В рамках данного исследования впервые проведен анализ многолетней пространственной изменчивости и количественных оценок характеристик в области АФЗ в Баренцевом и Карском морях.

Для детектирования положения и параметров АФЗ был применен подход на основе кластерного анализа на базе комплексирования спутниковых данных о поверхностной температуре и ее градиентах.

В работе были рассчитаны и представлены количественные оценки ТПМ и их градиентов в АФЗ за август и сентябрь 2002–2020 гг. Многолетний градиент ТПМ во фронтальной зоне составил $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, а площадь 348 тыс. км^2 . Межгодовые колебания термического градиента составили от $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ до $0,09\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, а площади АФЗ – от 159 до 489 тыс. км². При этом отличительной чертой данного исследования является описание межгодовой изменчивости поверхностной АФЗ в условиях меняющегося климата Арктики. Поверхностная температура АФЗ на фоне таяния льдов в последнее десятилетие стремительно растет, при этом поверхностный термический градиент остается стабильным. Площадь АФЗ характеризуется цикличностью роста/спада ее величины с интервалом от 3 до 4 лет и в целом соотносится с параметрами площади и сплоченности льдов. Анализ пространственного положения АФЗ показал, что в последние годы фронтальная зона значительно смещается на север в область открытых вод Северного Ледовитого океана и регистрируется в Баренцевом и Карском морях только в августе.

По оценкам площади и сплоченности льдов в северных районах Баренцева и Карского моря со сдвигом в 10 месяцев возможно судить о характере изменчивости оценок поверхностной температуры, ее градиента и площади АФЗ. Изменение зимних индексов глобальной атмосферной циркуляции *NAO* может определять изменение ТПМ в АФЗ в летний сезон. Полученные корреляционные связи впоследствии можно использовать для создания прогностической модели, описывающей характеристики области АФЗ.

Следующие работы будут направлены на исследование синоптической изменчивости АФЗ и создании модели долгосрочного прогноза ее основных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kumar A., Yadav J., Mohan R.* Spatio-temporal change and variability of Barents-Kara sea ice, in the Arctic: Ocean and atmospheric implications // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 753. 142046. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142046
2. *Parkinson C. L., Cavalieri D. J.* Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008. Vol. 113, iss. C7. C07003. doi:10.1029/2007jc004558
3. Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011 / J. Maslanik [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38, iss. 13. L13502. doi:10.1029/2011gl047735
4. *Serreze M. C., Stroeve J.* Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015. Vol. 373, iss. 2045. 20140159. doi:10.1098/rsta.2014.0159
5. In situ measurements of an energetic wave event in the Arctic marginal ice zone / C. O. Collins [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42, iss. 6. P. 1863–1870. doi:10.1002/2015gl063063

6. *McPhee M. G., Maykut G. A., Morison J. H.* Dynamics and thermodynamics of the ice/upper ocean system in the marginal ice zone of the Greenland Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1987. Vol. 92, iss. C7. P. 7017–7031. doi:10.1029/jc092ic07p07017
7. *Ginsburg A. I., Fedorov K. N.* On the multitude of forms of coherent motions in Marginal ICE Zones (MIZ) // *Mesoscale/Synoptic Coherent Structures in Geophysical Turbulence* / Edited by J. C. J. Nihoul, B. M. Jamart. Amsterdam : Elsevier B.V., 1989. P. 25–39. (Elsevier Oceanography Series ; vol. 50). doi:10.1016/s0422-9894(08)70175-2
8. *Иванов В. В., Алексеев В. А., Репина И. А.* Возрастание воздействия атлантических вод на ледяной покров Северного Ледовитого океана // *Международная конференция, посвященная памяти академика А.М. Обухова, Москва, 13–16 мая 2013 года «Турбулентность, динамика атмосферы и климата»* : сборник трудов. М. : ГЕОС, 2014. С. 336–344.
9. Многолетние изменения характеристик и циркуляции глубинных вод на севере Атлантического океана: роль региональных и внешних факторов / Ю. В. Селиванова [и др.] // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 1. С. 18–22. doi:10.7868/S0030157416010184
10. Status and trends in the structure of Arctic benthic food webs / M. Kędra [et al.] // *Polar Research*. 2015. Vol. 34, iss. 1. 23775. doi:10.3402/polar.v34.23775
11. *Макаревич П. Р., Олейник А. А.* Фитопланктон Баренцева моря в весенний период: состав и структура в районе ледовой кромки // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2017. Т. 8, № 2–4. С. 50–58. URL: http://www.mmbi.info/fs/files/1290/Okeanologiya_vyp_4_trudy_2_17.pdf (дата обращения: 04.04.2022).
12. *Van Aken H. M., Budéus G., Hähnel M.* The anatomy of the Arctic Frontal Zone in the Greenland Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1995. Vol. 100, iss. C8. P. 15999–16014. doi:10.1029/95jc01176
13. *Родионов В. Б., Костяной А. Г.* Океанические фронты морей Северо-Европейского бассейна. М. : ГЕОС, 1998. 290 с.
14. *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. doi:10.7868/S2073667319010076
15. The Evolution of a shallow front in the Arctic marginal ice zone / S. Brenner [et al.] // *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2020. 8. Art. 17. doi:10.1525/elementa.413
16. *Моисеев Д. В., Жичкин А. П.* Термохалинные условия в прикромочной зоне на севере Баренцева моря в апреле 2016 года // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2017. Т. 8, № 2–4. С. 10–25. EDN ZWMYVF. URL: http://www.mmbi.info/fs/files/1290/Okeanologiya_vyp_4_trudy_2_17.pdf (дата обращения: 04.11.2022).
17. *Атаджанова О. А., Зимин А. В.* Анализ характеристик проявлений субмезомасштабных вихрей Баренцева, Карского и Белого морей по данным спутниковых наблюдений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 3. С. 36–45. doi:10.7868/S2073667319030055
18. *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
19. *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, Suppl. 1. P. i3–i9. doi:10.1093/icesjms/fsz159
20. *Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008. Vol. 113, iss. C2. C02S03. doi:10.1029/2005JC003384
21. *Нестеров Е. С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М. : Триада Лтд., 2013. 144 с.
22. *Осадчиев А. А.* Речные плюмы. М. : Научный мир, 2021. 284 с.

23. *Johannessen O. M., Foster L. A.* A note on the topographically controlled Oceanic Polar Front in the Barents Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1978. Vol. 83, iss. C9. P. 4567–4571. doi:10.1029/jc083ic09p04567
24. *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, iss. 6. P. 1369–1390. doi:10.1016/0967-0645(95)00046-1
25. *Harris C. L., Plueddemann A. J., Gawarkiewicz G. G.* Water mass distribution and polar front structure in the western Barents Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998. Vol. 103, iss. C2. P. 2905–2917. doi:10.1029/97jc02790
26. *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, iss. 3. P. 1896–1906. doi:10.1002/2017jc013524

Об авторах:

Коник Александр Александрович, младший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (19053, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30); аспирант третьего года обучения Санкт-Петербургского государственного университета (199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9), **WoS ResearcherID: AAB-7195-2020**, **ORCID ID: 0000-0002-2089-158X**, **Scopus Author ID: 57203864647**, konikrshu@gmail.com

Зимин Алексей Вадимович, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (19053, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), доктор географических наук; профессор Санкт-Петербургского государственного университета (199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9), **WoS ResearcherID: C-5885-2014**, **Scopus Author ID: 55032301400**, zimin2@mail.ru