

Изменчивость десятилетних горизонтальных термохалинных градиентов на поверхности Баренцева моря в летние сезоны 1993–2022 годов

А. А. Коник¹ ✉, О. А. Атаджанова^{1, 2}

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

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ konikrshu@gmail.com

Поступила в редакцию 04.08.2023; одобрена после рецензирования 29.08.2023; принята к публикации 15.11.2023.

Аннотация

Цель. Проведен сравнительный анализ десятилетних горизонтальных градиентов термохалинных полей в Баренцевом море в летние периоды 1993–2022 гг., полученных по результатам реанализа и спутниковых измерений, с целью выбора наиболее предпочтительного массива данных для исследований поверхностных проявлений фронтальных зон.

Методы и результаты. За летние периоды 1993–2022 гг. на основе среднемесячных данных о температуре *GHRSSST OSTIA*, *MODIS/Aqua* и *VIIRS/Suomi NPP* и среднемесячных данных о температуре и солёности *CMEMS GLORYS12V1*, *MERCATOR PSY4QV3R1* были рассчитаны поля десятилетних и фоновых термохалинных градиентов на поверхности Баренцева моря. Представлены количественные оценки градиентов температуры и солёности за отдельные десятилетия для разных массивов данных, выполнен сравнительный анализ этих оценок и описаны физико-географические характеристики фронтальных зон. Максимальные термохалинные градиенты на поверхности регистрируются в июле. По данным из всех источников значение фонового горизонтального термического градиента за три десятилетия увеличивается. В летний период на поверхности Баренцева моря во всех массивах данных прослеживается положение Полярной фронтальной зоны. По данным *CMEMS GLORYS12V1* и *MERCATOR PSY4QV3R1* в поле солёности наблюдаются Прибрежная и Арктическая фронтальные зоны.

Выводы. Разница между рассчитанными оценками горизонтального градиента температуры может составлять более 0,01 °C/км, что сопоставимо с величиной среднего климатического градиента в Баренцевом море. Наиболее близки к этой оценке значения термического градиента, полученные по данным *CMEMS GLORYS12V1* и *MERCATOR PSY4QV3R1*, что позволяет отнести указанные океанологические базы к массиву данных, наиболее предпочтительному для анализа поверхностных проявлений фронтальных зон в Баренцевом море.

Ключевые слова: фронтальные зоны, градиент температуры, спутниковые данные, реанализ, Баренцево море, температура поверхности моря

Благодарности: данная работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2024-0028 (ИО РАН) и № FNNN-2024-0017 (МГИ РАН).

Для цитирования: Коник А. А., Атаджанова О. А. Изменчивость десятилетних горизонтальных термохалинных градиентов на поверхности Баренцева моря в летние сезоны 1993–2022 годов // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 1. С. 51–64. EDN BSCNRJ.

Variability of Decadal Horizontal Thermohaline Gradients on the Surface of the Barents Sea during Summer Season in 1993–2022

A. A. Konik¹ ✉, O. A. Atadzhanova^{1, 2}

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

² Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ konikrshu@gmail.com

Abstract

Purpose. The paper is purposed at comparative analysis of the decadal horizontal gradients of thermohaline fields in the Barents Sea during the summer periods in 1993–2022 derived from the reanalysis and the satellite measurements with the aim to select the most suitable data array for studying the surface manifestations of frontal zones.

Methods and Results. The fields of decadal and background thermohaline gradients on the Barents Sea surface were calculated for the summer periods in 1993–2022 based on the monthly mean temperature data from *GHRSSST OSTIA*, *MODIS/Aqua*, and *VIIRS/Suomi NPP*, as well as on the monthly mean temperature and salinity data from *CMEMS GLORYS12V1* and *MERCATOR PSY4QV3R1*. The quantitative estimates of temperature and salinity gradients were obtained for certain decades using different datasets, and a comparative analysis of these estimates was performed along with a description of the physical and geographical characteristics of frontal zones. Maximum thermohaline gradients on the surface were observed in July. Based on the data from all the sources, the background horizontal thermal gradient has been increasing over three decades. During a summer period, the Polar Frontal Zone was identified on the surface of the Barents Sea in all the data arrays, whereas the Coastal and Arctic Frontal Zones were observed in the salinity field based on the *CMEMS GLORYS12V1* and *MERCATOR PSY4QV3R1* data.

Conclusions. The difference between the calculated estimates of horizontal temperature gradient can exceed 0.01 °C/km that is comparable to the magnitude of the average climate gradient in the Barents Sea. The thermal gradient values obtained from the *CMEMS GLORYS12V1* and *MERCATOR PSY4QV3R1* reanalysis data are the closest to this estimate that permits to classify these data arrays as the most preferable ones for analyzing the surface manifestations of frontal zones in the Barents Sea.

Keywords: frontal zones, temperature gradient, satellite data, reanalysis, Barents Sea, sea surface temperature

Acknowledgements: The work was carried within the framework of state assignments No. FMWE-2024-0028 (IO RAS) and No. FNNN-2024-0017 (MHI RAS).

For citation: Konik, A.A. and Atadzhanova, O.A., 2024. Variability of Decadal Horizontal Thermohaline Gradients on the Surface of the Barents Sea during Summer Season in 1993–2022. *Physical Oceanography*, 31(1), pp. 46–58.

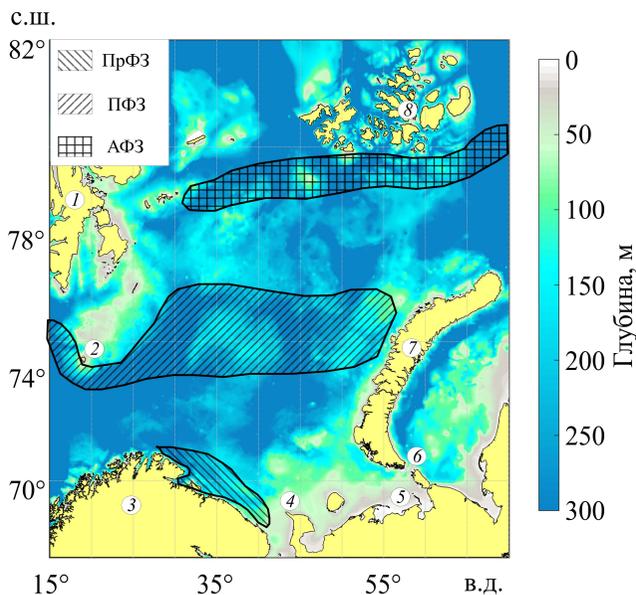
Введение

Фронтальные зоны в морях и океанах представляют собой сложное геофизическое явление, которое влияет на формирование малых вихревых структур, внутренних волн, изменчивость биогеохимических циклов [1–3]. Образуюсь на границе районов взаимодействия вод с различными гидрологическими характеристиками, фронтальные зоны отличаются сложной внутренней структурой и динамикой.

Одной из наиболее значимых проблем, связанных с фронтальными зонами в Мировом океане, является методика их определения. Фронтальная зона, со-

гласно работе ¹, – это область обостренных пространственных градиентов термодинамических характеристик по сравнению со средним равномерным распределением между устойчиво существующими экстремумами, а основной фронтальный раздел (фронт) внутри фронтальной зоны – это поверхность внутри фронтальной зоны, которая совпадает с поверхностью максимального градиента характеристики.

Существует целый спектр работ [4–8], в рамках которых на основе данных *in situ*, спутниковых измерений или реанализа с помощью различных методов и подходов исследуется пространственная изменчивость и характеристики фронтальных зон. Совокупно большинство таких исследований объединены единым для Мирового океана ¹ критерием определения фронтальной зоны – десятикратным превышением градиента гидрофизических параметров над фоновым (осредненная величина градиента по пространству). Вместе с тем, по сравнению с другими частями Мирового океана, моря Арктики большую часть года являются относительно инертной системой, что приводит к гораздо меньшей величине прежде всего горизонтальных гидрофизических градиентов и осложняет процесс идентификации фронтальных зон.



Р и с. 1. Композитная схема крупномасштабных фронтальных зон Баренцева моря по [4–10]: 1 – арх. Шпицберген; 2 – о. Медвежий; 3 – Скандинавский п-ов; 4 – м. Канин Нос; 5 – Печорское море; 6 – пр. Карские ворота; 7 – арх. Новая Земля; 8 – арх. Земля Франца-Иосифа. ПрФЗ – Прибрежная фронтальная зона; ПФЗ – Полярная фронтальная зона; АФЗ – Арктическая фронтальная зона

Fig. 1. Composite scheme of large-scale frontal zones in the Barents Sea based on [4–10]: 1 – Svalbard; 2 – Bear Island; 3 – Scandinavian Peninsula; 4 – Kanin Nose; 5 – Pechora Sea; 6 – Kara Gate; 7 – Novaya Zemlya; 8 – Franz Josef Land. CFZ – Coastal frontal zone; PFZ – Polar frontal zone; AFZ – Arctic frontal zone

¹ Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. 296 с.

Баренцево море (рис. 1) относится к бассейну Северного Ледовитого океана и характеризуется сложной системой поверхностных и подповерхностных фронтальных зон, которые объединяются в наиболее крупные Прибрежную, Полярную и Арктическую фронтальные зоны [5, 9–11]. Данные фронтальные зоны являются важной частью гидрологического режима Баренцева моря, влияют на его термохалинные характеристики, ледовые условия и распределение биогенов [4, 8]. Согласно общей концепции, принятой большим числом исследователей (см. работу ² и [7, 8]), для определения фронтальной зоны на поверхности Баренцева моря достаточно двукратного превышения градиентом гидрофизической характеристики его фонового значения. В ряде работ [5, 7–8] оценки величины фонового градиента Баренцева моря, на основе которой затем определяется критерий для регистрации положения и характеристик фронтальных зон, могут варьировать в пределах 0,005–0,01 °С/км для температуры и 0,005 ЕПС/км для солёности. Однако гидрологические особенности моря (отрицательная температура вод, ледяной покров) и климатические изменения [12–14] воздействуют на термохалинные поля, что в итоге сказывается на величине фонового горизонтального градиента и приводит к необходимости уточнения его оценок.

Поэтому в настоящее время определение фонового горизонтального градиента Баренцева моря остается актуальной проблемой, решение которой помогло бы улучшить качество оценки изменчивости фронтальных зон в данном регионе. Таким образом, основная цель данной работы заключается в сравнительном анализе горизонтальных градиентов термохалинных полей в Баренцевом море, рассчитанных по десятилетиям с 1993 по 2022 г. за летние периоды по спутниковым и модельным (реанализ, прогноз, ассимиляция) данным.

Данные и методы

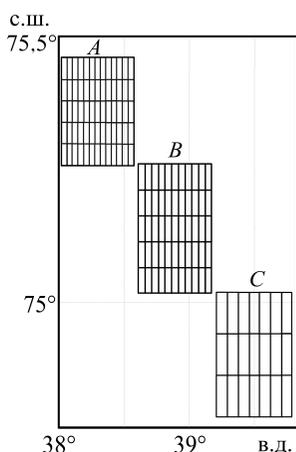
Для расчета градиентов использовались различные данные реанализа и спутниковых измерений о температуре и солёности Баренцева моря с пространственным шагом по широте и долготе от 4 до 25 км за летние периоды с июня по август в течение трех десятилетий с 1993 по 2022 г. На рис. 2 наглядно представлена разница в масштабах сеток, которые заложены в каждый из массивов используемых данных.

Для анализа термических характеристик использовались среднемесячные данные о температуре поверхности моря (ТПМ) уровня обработки L3 (URL: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), полученные с помощью съемки в видимом и ИК-диапазоне с пространственным разрешением 0,05° спутниковым спектрометрическим прибором MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), установленным на борту спутника Aqua, за теплые периоды 2003–2022 г. и радиометром VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) на борту Suomi NPP за 2013–2022 гг. [15].

Продукт GHRSSST OSTIA (*The Group for High Resolution Sea Surface Temperature Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis*) содержит осредненные с помощью оптимальной интерполяции поля данных на глобальной

² Ожигин В. К. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск : ПИНРО, 2016. 260 с.

сетке с разрешением $0,054^\circ$ по широте и долготе [16]. *GHRSSST OSTIA* основывается на спутниковых данных о ТПМ с датчиков высокого разрешения (*AVHRR*, *AMSR-E*, *AATSR*) и данных, полученных с буев. Для расчетов использовались суточные данные *OSTIA* за июнь – август 2013–2022 гг., которые предварительно усреднялись до месячного интервала.



Р и с. 2. Схематичное представление сеток для каждого массива данных: *A* – *MODIS/Aqua* и *VIIRS/Suomi NPP*; *B* – *GHRSSST OSTIA*; *C* – *GLORYS12v1* и *PSY4QV3R1*

Fig. 2. Schematic representation of grids for each data array: *A* – *MODIS/Aqua* and *VIIRS/Suomi NPP*; *B* – *GHRSSST OSTIA*; *C* – *GLORYS12v1* and *PSY4QV3R1*

Продукт *Global Ocean Physics Reanalysis*³ (сокр. *CMEMS GLORYS12v1*) содержит в себе среднемесячные и суточные гидрофизические поля с глобальным охватом в разрешении $0,083^\circ$ по долготе и широте для 50 горизонтов. Модельная составляющая *GLORYS12v1* – система реанализа *ECMWF* (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) *ERA-Interim*, использующая фильтр Калмана для ассимиляции [17] данных о температуре, солёности, течениях, уровне моря и поверхности льда. Для расчетов горизонтальных градиентов использовались среднемесячные значения температуры и солёности воды на поверхности за летний период с июня по август 1993–2020 гг.

Использовался также продукт, в основе которого лежит прогностическая модель *Global Ocean 1/12° Physics Analysis and Forecast updated Daily*⁴ (сокр. *MERCATOR PSY4QV3R1*) является продолжением *CMEMS GLORYS12v1*. Он обеспечивает воспроизведение среднесуточных гидрофизических полей для всего Мирового океана с разрешением $0,083^\circ$. Продукт *MERCATOR PSY4QV3R1* содержит ежедневные данные об уровне океана, солёности, температуре, глубине перемешанного слоя и распространении льда. В *MERCATOR PSY4QV3R1* заложена численная модель *NEMO* [18] с 50 неравномерно расположенными по глубине горизонтами для большинства гидрофизических характеристик. Для исследования использовались среднемесячные данные о температуре и солёности воды на поверхности за летние периоды с июня по август 2021–2022 гг.

Качество используемых спутниковых данных зависит как от вида зондирующих систем, так и от состояния поверхностных вод исследуемой акватории. Погрешность используемых в работе спутниковых данных (*VIIRS/Suomi*

³ Global Ocean Physics Analysis and Forecast : [Dataset] / E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS). doi:10.48670/moi-00016

⁴ Global Ocean Physics Reanalysis : [Dataset] / E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS). doi:10.48670/moi-00021

NPP и *MODIS/Aqua*) о ТПИМ не превышает $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как погрешность данных реанализа (*GHR SST OSTIA*, *CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1*) – $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Погрешность данных реанализа (*CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1*) о поверхностной солености в среднем составляет менее $0,1$ ЕПС.

Поля поверхностных десятилетних градиентов рассчитывались для всех массивов данных одинаково. Первый этап включал в себя помесечное осреднение полей температуры и солености для каждого десятилетия. Второй этап заключался в расчете горизонтальных градиентов температуры и солености согласно методу, неоднократно апробированному для Баренцева моря [8, 19]. На третьем этапе определялся модуль десятилетнего горизонтального градиента. Вначале производился расчет шага по параллели и меридиану в километрах, далее выполнялся расчет зональной и меридиональной составляющих градиента для каждого узла сетки. Итоговый десятилетний модуль горизонтального градиента рассчитывался как квадратный корень из суммы квадратов зональной и меридиональной составляющих.

Результаты исследования

Градиенты температуры по данным *MODIS/Aqua* и *VIIRS/Suomi NPP*.

На рис. 3 представлены карты поверхностного распределения горизонтальных градиентов температуры по спутниковым данным за июль 1993–2022 гг.

По данным *MODIS/Aqua*, в июне максимальный термический градиент, достигающий $0,03\text{--}0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, наблюдается в центральной и западной частях Баренцева моря вблизи арх. Шпицберген и о. Медвежьего. В первое десятилетие (2003–2012 гг.) в июне основной фронтальной раздел Полярной фронтальной зоны прослеживается во всей центральной части Баренцева моря, в то время как с 2013 по 2022 г. он наблюдается только в западной части моря в области $15^{\circ}\text{--}35^{\circ}$ в. д. При этом в южной части моря значения термических горизонтальных градиентов не велики и в среднем составляют $0,01\text{--}0,015\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, а фронт в Прибрежной фронтальной зоне не прослеживается. С 2013 по 2022 г. на севере моря наблюдаются более ярко выраженные поверхностные градиенты, значения которых в среднем достигают $0,02\text{--}0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, что соотносится с десятилетним положением Арктической фронтальной зоны [11]. В Печорском море в июне за два десятилетия июня градиент температуры составляет $0,03\text{--}0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$. В июле наблюдается максимальный градиент температуры. В оба десятилетия (см. рис. 3, *a, b*) максимальные значения $0,03\text{--}0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ регистрируются около о. Медвежьего и в Печорском море. В августе за первое и второе десятилетия наблюдается уменьшение термического градиента. Это отражается, например, на Полярной фронтальной зоне, основной фронтальной раздел которой в период с 2002 по 2012 г. проявляется южнее о. Медвежьего и далее в центральной части Баренцева моря, в то время как в 2013–2022 гг. в области $20^{\circ}\text{--}45^{\circ}$ в. д. его положение сложно отследить. Кроме того, в августе 2002–2013 гг. вблизи побережья Скандинавского полуострова отмечается полоса больших значений термического градиента ($> 0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$), которая соотносится с положением Прибрежного фронта, а в Печорском море наблюдаются отдельные участки с термическим градиентом, не превышающим $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

Сравнительный анализ по десятилетиям показывает, что максимальные поверхностные градиенты температуры по данным *MODIS/Aqua* регистрируются в июле 2002–2013 гг. Среднее значение горизонтального термического градиента температуры Баренцева моря за прошедшие два десятилетия уменьшилось на 0,01 °C/км.

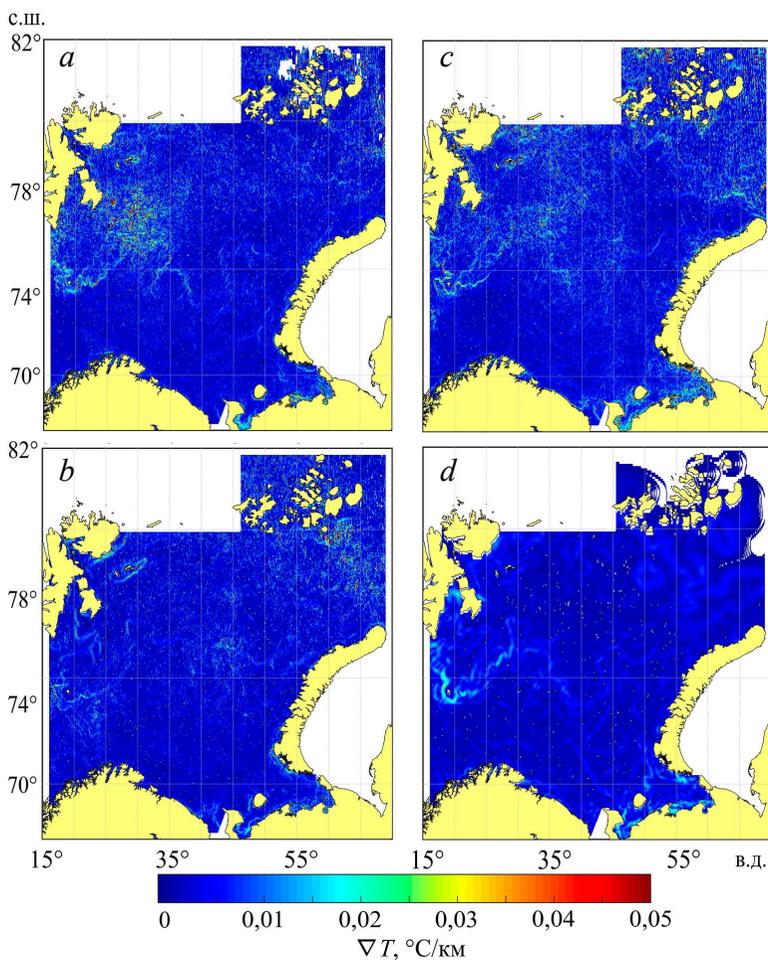


Рис. 3. Распределение десятилетних горизонтальных градиентов температуры Баренцева моря в июле по данным: *a* – *MODIS/Aqua* за 2003–2013 гг.; *b* – *MODIS/Aqua* за 2013–2022 гг.; *c* – *VIIRS/Suomi NPP* за 2013–2022 гг.; *d* – *GHRSSST OSTIA* за 2013–2022 гг.

Fig. 3. Distribution of decadal horizontal temperature gradients in the Barents Sea in July based on the satellite data: *a* – *MODIS/Aqua*, 2003–2013; *b* – *MODIS/Aqua*, 2013–2022; *c* – *VIIRS/Suomi NPP*, 2013–2022; *d* – *GHRSSST OSTIA*, 2013–2022

Анализ спутниковых продуктов *VIIRS/Suomi NPP* за летний период 2013–2022 гг. показал, что величина термического градиента по данным из этой базы соотносится с его значениями из массива *MODIS/Aqua*. На рис. 3, *c* в качестве примера приведена карта для июля. Так, Полярная фронтальная зона также проявляется только в районе о. Медвежьего, где значение градиента ТПМ с июня по август варьирует в пределах 0,04–0,05 °C/км, а в Печорском море

его значение соизмеримо с величиной градиента ТПМ по данным *MODIS/Aqua* и составляет 0,03–0,04 °C/км за теплый сезон. При этом вблизи арх. Новая Земля и Земля Франца-Иосифа выделяются отдельные высокоградиентные области, которые можно отнести к Арктической фронтальной зоне. Положение Прибрежной фронтальной зоны за 2013–2022 гг. по данным ТПМ не прослеживается.

Градиенты температуры по данным *GHRSSST OSTIA*. По данным *GHRSSST OSTIA*, максимальное значение градиента температуры в летний период в Баренцевом море не превышает 0,03 °C/км. Чаще всего такие градиенты наблюдаются в июне и июле (см. рис. 3, *d*), в августе их величина уменьшается. Высокоградиентные области прослеживаются в Полярной фронтальной зоне и Печорском море. Положение основного фронта Полярной фронтальной зоны по данным *GHRSSST OSTIA* более выраженное, чем по спутниковым данным, особенно около арх. Шпицберген и о. Медвежьего. Кроме того, на севере Баренцева моря прослеживается Арктическая фронтальная зона, где градиент может достигать 0,025 °C/км. В южной части моря значение градиента не превышает 0,01 °C/км. Стоит отметить, что по данным *OSTIA* в июле прослеживается Прибрежный фронт с градиентом, не превышающим 0,02 °C/км. В целом значения поверхностного градиента по данным реанализа *GHRSSST OSTIA* ниже 0,02 °C/км, чем по спутниковым данным *MODIS/Aqua* и *VIIRS/Suomi NPP*.

Градиенты температуры и солёности по данным *CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1*. На рис. 4 представлены карты поверхностного распределения горизонтальных градиентов температуры по данным реанализа за июль 1993–2022 гг.

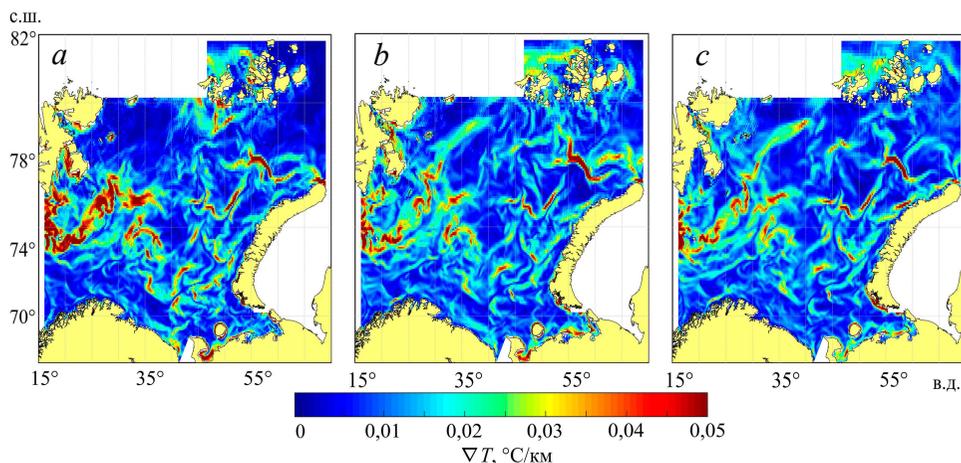


Рис. 4. Распределение десятилетних горизонтальных градиентов температуры Баренцева моря в июле по данным реанализа: *a* – *CMEMS GLORYS12v1* за 1993–2002 гг.; *b* – *CMEMS GLORYS12v1* за 2003–2012 гг.; *c* – *CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1* за 2013–2022 гг.

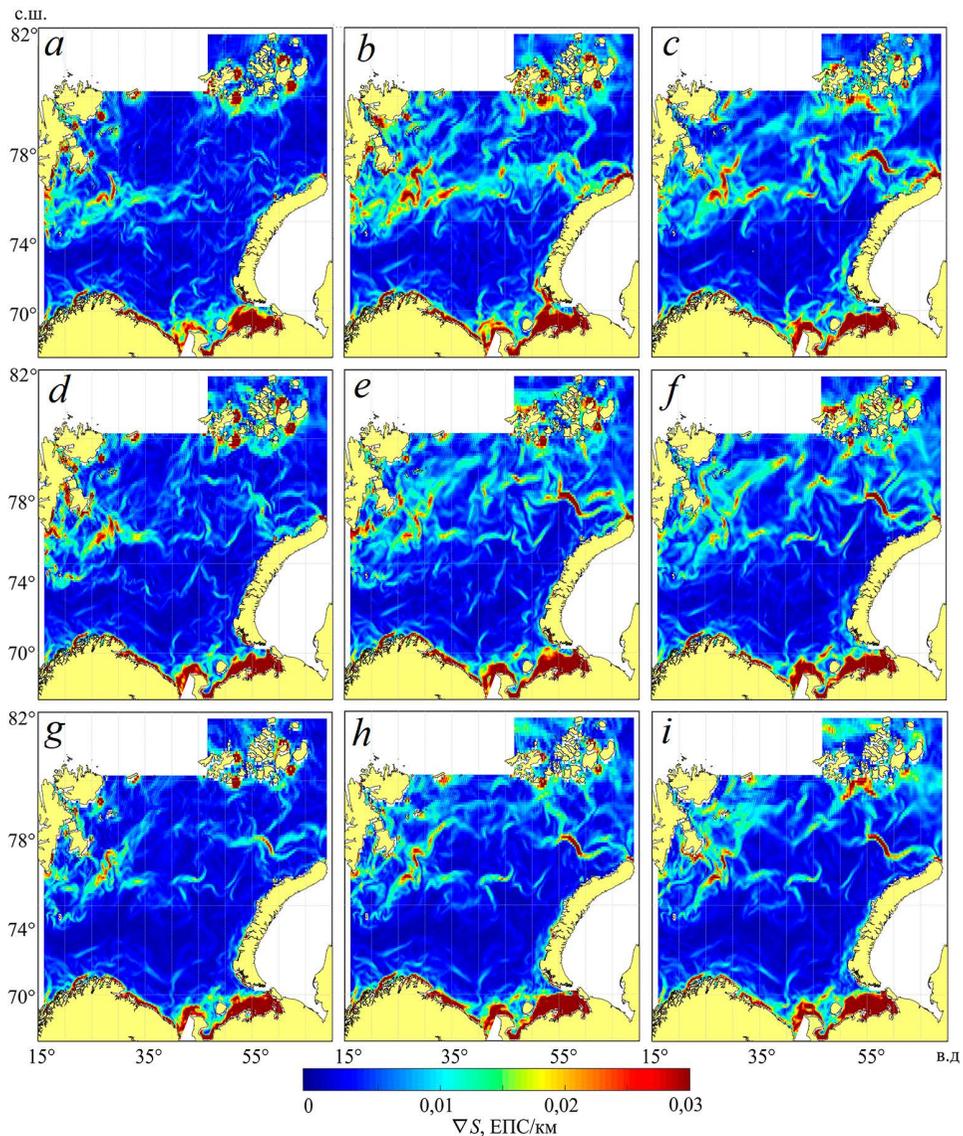
Fig. 4. Distribution of decadal horizontal temperature gradients in the Barents Sea in July based on the reanalysis data: *a* – *CMEMS GLORYS12v1*, 1993–2002; *b* – *CMEMS GLORYS12v1*, 2003–2012; *c* – *CMEMS GLORYS12v1* and *MERCATOR PSY4QV3R1*, 2013–2022

Во все месяцы по данным реанализа *CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1* прослеживаются высокоградиентные зоны ($> 0,07$ °C/км), соответствующие квазистационарной западной части Полярной фронтальной зоны.

Сравнение полей градиентов ТПМ в июне за три десятилетия показало, что области максимальных градиентов почти совпадают. Восточная часть Полярной фронтальной зоны в первом десятилетии менее выражена (градиенты меньше), чем в двух других. Июнь 2003–2012 гг. отличается высокими значениями градиентов вблизи арх. Земля Франца-Иосифа. В июле в каждом десятилетии (см. рис. 4) также ярко прослеживаются максимальные градиенты ($> 0,07$ °C/км), которые относятся к Полярной фронтальной зоне. Западная часть фронтальной зоны ярко выражена в июле 2013–2022 гг., при этом значения градиентов в ее восточной части существенно не меняются. В отличие от июня, в июле высокоградиентные ($> 0,07$ °C/км) области наблюдаются уже вблизи Карских ворот и в Печорском море, где максимальные градиенты отмечаются также и в третьем десятилетии. В августе за все три десятилетия максимальные значения поверхностных градиентов температуры ($> 0,07$ °C/км) отмечаются в западной и восточной частях Полярной фронтальной зоны. Отдельно стоит отметить области вблизи северной части арх. Новая Земля, Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, где величина термического градиента по сравнению с другими месяцами весомо возросла.

Анализ данных о ТПМ в летние периоды за три десятилетия показал, что в поле градиентов температуры лучше всего идентифицируются Полярная фронтальная зона и фронтальная зона в Печорском море, а максимумы (до $0,15$ °C/км) чаще всего наблюдаются в третьем десятилетии. Стоит также отметить, что по данным *CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1* Прибрежную фронтальную зону на поверхности за период с 1993 по 2022 г. идентифицировать не удалось.

На рис. 5 представлены карты горизонтального распределения градиента солености по данным реанализа *CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1*. Значительной изменчивости характеристики за все три исследуемых месяца не наблюдается. В июне небольшие высокоградиентные области ($> 0,03$ ЕПС/км) отмечаются в западной части Полярной и Прибрежной фронтальных зон, вблизи берегов арх. Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Максимальные халинные градиенты ($> 0,07$ ЕПС/км) фиксируются в Печорском море. В июле 2003–2012 гг., в отличие от других десятилетий, градиенты минимальны ($> 0,02$ ЕПС/км), особенно в западной части Полярной фронтальной зоны и в области Канина Носа. Значения градиентов в Печорском море и в области Прибрежной фронтальной зоны близки. В августе сохраняются тенденции июля – во второе десятилетие западная область Полярной фронтальной зоны менее выражена, чем в первое и третье, максимумы наблюдаются в Печорском море и в области Прибрежной фронтальной зоны.



Р и с. 5. Распределение десятилетних горизонтальных градиентов солености Баренцева моря по данным *CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1*: в июне (*a, b, c*), июле (*d, e, f*), августе (*g, h, i*) 1993–2002 (*a, d, g*), 2003–2012 (*b, e, h*), 2013–2022 гг. (*c, f, i*)

F i g. 5. Distribution of decadal horizontal salinity gradients in the Barents Sea based on the *CMEMS GLORYS12v1* and *MERCATOR PSY4QV3R1* data: in June (*a, b, c*), in July (*d, e, f*), in August (*g, h, i*), 1993–2002 (*a, d, g*), 2003–2012 (*b, e, h*), 2013–2022 (*c, f, i*)

Сравнительный анализ термохалинных градиентов Баренцева моря.

В таблице представлены количественные оценки изменчивости среднего по пространству градиента температуры и солености в летние сезоны за три рассматриваемых десятилетия.

**Горизонтальный градиент температуры и солёности Баренцева моря
с 1993 по 2022 г.**

**Horizontal gradient of temperature and salinity in the Barents Sea
in 1993–2022**

Источник данных / Data source	1993–2002			2003–2012			2013–2022		
	Июнь / June	Июль / July	Август / August	Июнь / June	Июль / July	Август / August	Июнь / June	Июль / July	Август / August
∇S , ЕПС/км / ∇S , PSU/km									
<i>CMEMS GLORYS12v1</i>	0,008	0,010	0,009	0,008	0,009	0,009	0,007	0,009	0,008
<i>MERCATOR PSY4QV3R1</i>									
∇T , °C/км / ∇T , °C/km									
<i>CMEMS GLORYS12v1</i>	0,013	0,014	0,013	0,014	0,014	0,013	0,014	0,014	0,014
<i>MERCATOR PSY4QV3R1</i>									
<i>MODIS/Aqua</i>	–	–	–	0,005	0,005	0,004	0,006	0,005	0,004
<i>VIIRS/Suomi NPP</i>	–	–	–	–	–	–	0,006	0,006	0,005
<i>GHRSSST OSTIA</i>	–	–	–	–	–	–	0,002	0,003	0,003

Полученные оценки показывают, что источник данных значительно влияет на величину осредненного по площади декадного поверхностного градиента. Максимальные значения фонового термического градиента ($> 0,014$ °C/км) по данным *CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1* наблюдаются в первом десятилетии в июле, а минимальные по *GHRSSST OSTIA* – в третьем десятилетии в июне ($0,003$ °C/км). Значение градиента температуры по данным спутниковых измерений в среднем на $0,005$ °C/км ниже, чем по результатам реанализа. Разница между оценками фонового градиента по используемым в работе данным может составлять более $0,01$ °C/км, что сопоставимо с величиной среднего климатического градиента в Баренцевом море¹. При этом наименьшая разница зафиксирована между фоновыми десятилетними градиентами, рассчитанными по данным *CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1*, и климатическим градиентом температуры из работы¹, что позволяет отнести эти массивы спутниковых измерений к наиболее предпочтительному источнику данных для анализа поверхностных проявлений фронтальных зон в Баренцевом море на климатических временных масштабах. Максимальные значения градиентов солёности по данным *CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1* регистрируются в первом десятилетии в июле ($0,1$ ЕПС/км), а минимальные – в третьем десятилетии в июле ($< 0,08$ ЕПС/км).

Анализ междесятилетней изменчивости показал, что по данным из всех источников фоновый горизонтальный термический градиент за три десятилетия незначительно увеличился. Такая ситуация возникает в результате изменения объема переноса атлантических вод, что может быть связано с рекордно теплым периодом, который в последнее десятилетие отмечается в Баренцевом море [20]. Увеличение термического градиента в Баренцевом море наблюдается в июле в результате ослабления поверхностных течений и формирования пикноклина, приводящего к значительной неустойчивости в поверхностном слое [21]. Август же характеризуется уменьшением градиента температуры, что связано со снижением числа областей неоднородности в результате повышения температуры до сезонного максимума и устойчивой стратификации в Баренцевом море.

Величина поверхностных градиентов солености за последние три десятилетия существенно уменьшилась, при этом максимум регистрируется в июле. Такая междесятилетняя изменчивость может возникать вследствие сокращения ледяного покрова в Баренцевом море [22, 23], которое влияет на интенсивность взаимодействия между океаном и атмосферой и в конечном счете на величину поверхностного горизонтального градиента не только солености, но и температуры. Важно отметить, что на существенную разницу значений термохалинных градиентов, полученных по данным из различных массивов, могли повлиять гидрометеорологические (облачность, ветер) и ледовые процессы, которые в данном исследовании не учитывались.

Заключение

На основе набора данных реанализа и спутниковых измерений был проведен сравнительный анализ горизонтальных десятилетних градиентов термохалинных полей в Баренцевом море за летний период 1993–2022 гг. Анализ поверхностных градиентов показал высокую степень их изменчивости по пространству и времени как внутри теплого сезона, так и между десятилетиями.

Во все месяцы летнего сезона и во всех массивах данных на поверхности прослеживается положение крупномасштабной Полярной фронтальной зоны. В июле и августе по данным *CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1* можно определить положение Прибрежной и Арктической фронтальных зон. Установлено, что максимальные фоновые градиенты на поверхности Баренцева моря по данным из всех представленных массивов регистрируются в июле (0,014 °C/км и 0,01 ЕПС/км), а в августе величина градиентов снижается. Показано, что усиление переноса атлантических вод и уменьшение ледяного покрова в Баренцевом море могут быть основными факторами увеличения фонового термического градиента и уменьшения градиента солености.

Разница между рассчитанными оценками фоновых горизонтальных градиентов температуры может достигать более 0,01 °C/км, что сопоставимо со значением среднего климатического градиента температуры в Баренцевом море. Наиболее близка к данному значению величина термического градиента по данным из баз *CMEMS GLORYS12v1* и *MERCATOR PSY4QV3R1*, которые потенциально могут являться наиболее предпочтительным инструментом для определения и анализа многолетней изменчивости поверхностных проявлений фронтальных зон в Баренцевом море.

Таким образом, весоное влияние на получаемую величину горизонтального градиента температуры и солености может оказывать выбор источника данных из различных массивов реанализа или спутниковых измерений для расчетов, что необходимо учитывать при получении итоговой оценки фонового градиента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ice-Edge Eddies in the Fram Strait Marginal Ice Zone / O. M. Johannessen [et al.] // *Science*. 1987. Vol. 236, iss. 4800. P. 427–429. doi:10.1126/science.236.4800.427
2. Air–sea interaction over ocean fronts and eddies / R. J. Small [et al.] // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2008. Vol. 45, iss. 3–4. P. 274–319. doi:10.1016/j.dynatmoce.2008.01.001
3. *Boeckel B., Baumann K.-H.* Vertical and lateral variations in coccolithophore community structure across the subtropical frontal zone in the South Atlantic Ocean // *Marine Micropaleontology*. 2008. Vol. 67, iss. 3–4. P. 255–273. doi:10.1016/j.marmicro.2008.01.014
4. Physical structure of the Barents Sea Polar Front near Storbanken in August 2007 / S. Våge [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2014. Vol. 130. P. 256–262. doi:10.1016/j.jmarsys.2011.11.019
5. *Oziel L., Sirven J., Gascard J.-C.* The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011) // *Ocean Science*. 2016. Vol. 12, iss. 1. P. 169–184. doi:10.5194/os-12-169-2016
6. Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика в Баренцевом море / О. А. Атаджанова [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. № 3. С. 237–246. EDN VLPZEM. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-237-246
7. *Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В.* Сезонная изменчивость температурных фронтов на поверхности Баренцева моря // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 1. С. 78–90. EDN MJZHAL.
8. *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
9. Идентификация положения фронтальных зон на поверхности Баренцева моря по данным контактного и дистанционного мониторинга / Д. В. Моисеев [и др.] // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 2. С. 48–63. EDN JHJGVM. doi:10.25283/2223-4594-2019-2-48-63
10. *Коник А. А., Зимин А. В., Козлов И. Е.* Пространственно-временная изменчивость характеристик полярной фронтальной зоны в Баренцевом море в первые два десятилетия XXI века // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 4. С. 39–51. EDN GSFVHS. doi:10.7868/S2073667321040043
11. *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 BSBNO. doi:10.22449/0233-7584-2022-6-679-693
12. A new climate era in the sub-Arctic: Accelerating climate changes and multiple impacts / T. V. Callaghan [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37, iss. 14. L14705. doi:10.1029/2009gl042064
13. Future Arctic climate changes: Adaptation and mitigation time scales / J. E. Overland [et al.] // *Earth’s Future*. 2014. Vol. 2, iss. 2. P. 68–74. doi:10.1002/2013ef000162
14. *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. Vol. 25. 100548. doi:10.1016/j.polar.2020.100548
15. *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

16. OSTIA: An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system / J. D. Stark [et al.] // OCEANS 2007 – Europe. Aberdeen, UK : IEEE, 2007. P. 1–4. doi:10.1109/oceanse.2007.4302251
17. Poli P., Healy S. B., Dee D. P. Assimilation of Global Positioning System radio occultation data in the ECMWF ERA-Interim reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2010. Vol. 136, iss. 653. P. 1972–1990. doi:10.1002/qj.722
18. Explicit representation and parametrised impacts of under ice shelf seas in the z* coordinate ocean model NEMO 3.6 / P. Mathiot [et al.] // Geoscientific Model Development. 2017. Vol. 10, iss. 7. P. 2849–2874. doi:10.5194/gmd-10-2849-2017
19. Чвилев С. В. Фронтальные зоны Баренцева моря // Метеорология и гидрология. 1991. № 11. С. 103–110.
20. Трофимов А. Г., Карсаков А. Л., Ившин В. А. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека // Труды ВНИРО. 2018. Т. 173. С. 79–91. EDN YXTARF.
21. Пнюшков А. В. Исследование изменчивости структуры циркуляции вод Баренцева моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1(78). С. 27–37. URL: [http://old.aari.ru/misc/publicat/paa/ПAA-78/ПAA78-03%20\(27-37\).pdf](http://old.aari.ru/misc/publicat/paa/ПAA-78/ПAA78-03%20(27-37).pdf) (дата обращения: 02.08.2023).
22. Жичкин А. П. Климатические колебания ледовых условий в разных районах Баренцева моря // Метеорология и гидрология. 2012. № 9. С. 69–78. EDN PDTVID.
23. Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в XXI веке / В. В. Иванов [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. № 1. С. 13–25. EDN TKYDXO.

Об авторах:

Коник Александр Александрович, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30); кандидат географических наук, **SPIN-код: 5839-1738**, **WoS ResearcherID: AAB-7195-2020**, **ORCID ID: 0000-0002-2089-158X**, **Scopus Author ID: 57203864647**, konikrshu@gmail.com

Атаджанова Оксана Алишеровна, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), кандидат географических наук, **SPIN-код: 5016-2970**, **WoS ResearcherID: R-7835-2018**, **Scopus Author ID: 57188718743**, oksanam07@list.ru