

Научная статья
УДК 551.465.6
EDN AEMNOT

Фронтальные зоны как границы областей с разным диапазоном сезонной изменчивости поверхностной температуры воды в Северной Атлантике

И. Г. Шокурова *, Н. В. Никольский, Е. Д. Чернышова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: igshokurova@mail.ru*

Аннотация

Анализируется положение среднемноголетних океанических температурных фронтальных зон в сравнении с пространственным распределением амплитуды сезонной изменчивости температуры воды и градиентов амплитуды в Северной Атлантике. Рассматривается изменение амплитуды сезонного хода температуры воды вдоль меридиональных поверхностных разрезов через фронт Гольфстрима, Субтропический и Арктический фронты. Используются данные о потенциальной температуре воды на глубине 0.5 м океанического реанализа *ORAS5* (1958–2021 гг.). Положение фронтальных зон определяется на основе расчета горизонтальных градиентов температуры воды. Амплитуда сезонной изменчивости температуры воды вычисляется как половина разницы между максимальной и минимальной температурой в климатическом годовом ходе. Отмечается, что высокие значения амплитуды сезонного хода температуры воды наблюдаются в средних широтах, уменьшаясь в северном и южном направлениях. В экваториальной зоне, в Тропической Атлантике и в Арктике диапазон сезонной изменчивости температуры воды минимальный. Получено, что протяженные области, на которых происходит резкое изменение амплитуды сезонного хода температуры воды, совпадают с положением температурных фронтальных зон. Коэффициент корреляции между пространственным распределением градиентов поверхностной температуры воды и градиентов амплитуды ее сезонного хода равен 0.93. Фронт Гольфстрима, граничащий с водами Лабрадорского течения, разделяет области с наибольшей разницей в сезонной изменчивости температуры воды. Различие амплитуд сезонного хода температуры воды в областях, расположенных с двух сторон фронта Гольфстрима, Субтропического и Арктического фронтов, в основном обуславливается зимней разницей температуры. Полученные результаты показывают, что фронтальные зоны в океане разделяют области не только с разными термохалинными характеристиками, но и с разной амплитудой сезонной изменчивости поверхностной температуры воды.

Ключевые слова: температура воды, фронтальные зоны, амплитуда годового хода температуры воды, градиент температуры, сезонная изменчивость, Северная Атлантика

© Шокурова И. Г., Никольский Н. В., Чернышова Е. Д., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, формирующих изменчивость физического состояния морской среды на различных пространственно-временных масштабах».

Для цитирования: Шокурова И. Г., Никольский Н. В., Чернышова Е. Д. Фронтальные зоны как границы областей с разным диапазоном сезонной изменчивости поверхностной температуры воды в Северной Атлантике // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 6–18. EDN AEMNOT.

Frontal Zones as Boundaries of Areas with Different Range of Sea Surface Temperature Seasonal Variability in the North Atlantic

I. G. Shokurova *, N. V. Nikolsky, E. D. Chernyshova

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: igshokurova@mail.ru

Abstract

The paper analyses the position of the oceanic temperature frontal zones in comparison with the spatial distribution of the amplitude of the seasonal variability of water temperature and gradients of amplitude in the North Atlantic. The paper also considers the change in the amplitude of the water temperature seasonal variability along meridional surface transects through the Gulf Stream front, Subtropical and Arctic fronts. The authors use data on the potential water temperature at 0.5 m depth of the ORAS5 ocean reanalysis (1958–2021). The position of frontal zones is determined based on the calculation of horizontal water temperature gradients. The amplitude of the water temperature seasonal variability is calculated as half of the difference between the maximum and minimum temperature in the mean annual cycle. It is noted that high values of the amplitude of water temperature seasonal variations are observed in the mid-latitudes, decreasing in the northern and southern directions. In the equatorial zone, Tropical Atlantic and Arctic, the range of water temperature seasonal variability is minimal. The extended areas with a sharp change in the amplitude of the water temperature seasonal variations were found to coincide with the position of temperature frontal zones. The correlation coefficient between the spatial distribution of temperature gradients and gradients of its seasonal variation amplitude was 0.93. The Gulf Stream front bordering the waters of the Labrador Current separates the regions with the largest difference in the water temperature seasonal variability. The difference in the amplitude of the water temperature seasonal variations in the areas located on both sides of the Gulf Stream, Subtropical and Arctic fronts was mainly due to the winter temperature difference. The obtained results show that the frontal zones in the ocean separate regions not only with different thermohaline characteristics, but also with different amplitudes of the seasonal variability of surface water temperature.

Keywords: water temperature, frontal zones, amplitude of water temperature annual variations, temperature gradient, seasonal variability, North Atlantic

Acknowledgements: The work was carried out under state assignment of MHI RAS FNNN-2024-0014 “Fundamental studies of interaction processes in the sea–air system that form the physical state variability of the marine environment at various spatial and temporal scales”.

For citation: Shokurova, I.G., Nikolsky, N.V. and Chernyshova, E.D., 2025. Frontal Zones as Boundaries of Areas with Different Range of Sea Surface Temperature Seasonal Variability in the North Atlantic. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 6–18.

Введение

Протяженные области высоких градиентов температуры и солености на поверхности океана указывают на наличие океанических фронтов, являющихся границами водных масс с различными термохалинными характеристиками [1]. Области, внутри которых положение фронта меняется на суточных, сезонных и межгодовых временных масштабах, определяются как фронтальные зоны. Изучение процессов во фронтальных зонах связано со многими направлениями океанологической науки – физическим, биологическим, климатическим и другими. Фронты играют важную роль в процессах вертикального перемешивания в океане и вихреобразования [1, 2], взаимодействия атмосферы и океана [3]. Морские фронтальные зоны являются районами высокой биопродуктивности и важны как в промышленном, так и в природоохранном отношении, что обуславливает прикладное значение их изучения [4–8]. Многолетние изменения характеристик фронтальных зон могут использоваться для мониторинга и прогноза климатических изменений в океане [9].

В настоящее время в связи с появлением многолетних рядов спутниковых данных и данных реанализов на регулярной сетке с высоким пространственным разрешением изучение фронтов происходит наиболее интенсивно и проводится в разных научных направлениях и на различных пространственно-временных масштабах. В этом исследовании мы касаемся общих вопросов, связанных с океаническими фронтами, таких как положение крупномасштабных температурных фронтальных зон, значения градиентов, а также рассматриваем отличительные свойства областей, разделенных фронтальными зонами в Северной Атлантике.

В этом регионе присутствуют крупномасштабные фронты разных типов. К ним относятся фронты на границах Гольфстрима, Северо-Атлантического, Лабрадорского, Восточно-Гренландского, Норвежского течений, переносящих воду с характеристиками, отличающимися от характеристик окружающих вод; фронты в районах экваториального апвеллинга и берегового апвеллинга у Западной Африки; фронт субтропической зоны конвергенции, возникающий на границе более холодных вод, переносимых с севера экмановским переносом под действием западных ветров, и теплых вод, переносимых с юга под влиянием пассатов; Арктический фронт в Атлантическом секторе Арктики, разделяющий атлантические и арктические воды; полярный фронт границы ледяной зоны (Восточно-Гренландский полярный фронт); эстуарные соленостные фронты, например фронт стока реки Амазонки [2].

Положение температурных фронтов в Северной Атлантике, полученное на основе расчетов градиентов поверхностной температуры, приведено в работах [2, 10–13] и других. В приатлантическом секторе Арктики температурные фронты исследовались в работах [14–16] и многих других. Наиболее высокие горизонтальные градиенты поверхностной температуры находятся во фронтальной зоне Гольфстрима. Здесь отмечается и значительная сезонная

изменчивость градиентов температуры [13]. В этом же районе наблюдается наиболее высокая амплитуда сезонной изменчивости поверхностной температуры воды [17, 18]. Представляет интерес вопрос: связано ли изменение по пространству амплитуды сезонного цикла с положением фронтальных зон. Так, температурные фронты вдоль крупномасштабных течений присутствуют в течение всего года и разница в характеристиках годового хода температуры в окрестных водах неочевидна.

Целью работы является сравнение пространственного распределения амплитуды сезонного цикла температуры с положением фронтальных зон, а также анализ изменения амплитуды при пересечении фронтальных зон в Северной Атлантике.

Данные и методы исследования

В работе использовались среднемесячные данные океанического реанализа *ORAS5* о потенциальной температуре θ ($^{\circ}\text{C}$) на глубине 0.5 м с пространственным разрешением около 0.25° (с уменьшением до 9 км в полярных районах) за 1958–2021 гг. [19].

Для определения положения фронтальных зон рассчитывались абсолютные значения горизонтальных градиентов потенциальной температуры $\nabla\theta = \left(\frac{\partial\theta}{\partial x}, \frac{\partial\theta}{\partial y}\right)$ ($^{\circ}\text{C}/100$ км):

$$|\nabla\theta| = \sqrt{\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)^2}.$$

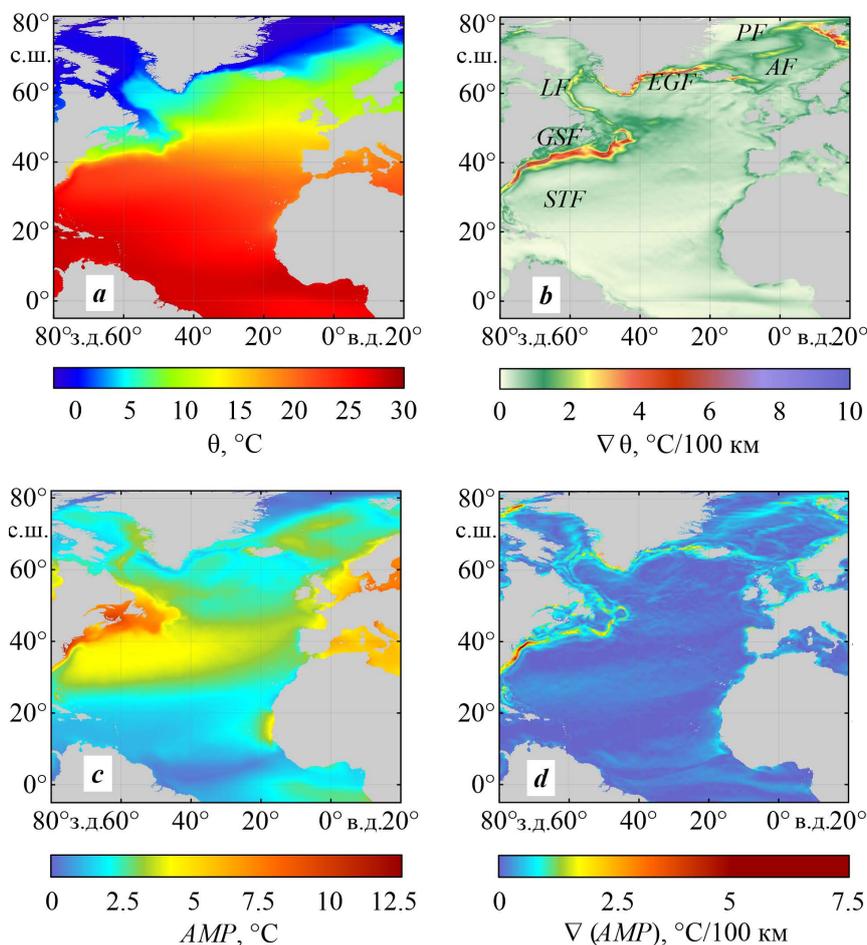
Компоненты вектора градиента вычислялись методом центральных конечных разностей. При расчете градиентов учитывалась широта места.

Амплитуда сезонной изменчивости температуры воды (*AMP*) рассчитывалась как половина разности между максимальным и минимальным значениями температуры в среднемноголетнем годовом ходе для каждого узла сетки. Для количественного анализа изменений амплитуды по пространству вычислялись ее горизонтальные градиенты. Участки с высокими значениями градиентов определялись как границы между областями с разной амплитудой сезонной изменчивости.

Пространственная изменчивость амплитуды годового хода температуры воды была рассмотрена на примерах меридиональных поверхностных разрезов, пересекающих фронтальные зоны Субтропического фронта, фронта Гольфстрима и Арктического фронта.

Результаты

Градиенты температуры в крупномасштабных температурных фронтах в Северной Атлантике. Крупномасштабные температурные фронты расположены в местах с резким изменением температуры воды (рис. 1, *a*), что проявляется в высоких значениях горизонтальных градиентов (рис. 1, *b*). По среднемноголетним данным, наиболее высокие градиенты температуры, превышающие $1^{\circ}\text{C}/100$ км, отмечаются во фронтальных зонах крупномасштабных течений, например системы течений Гольфстрим, Северо-Атлантического



Р и с . 1. Среднегодовья потенциальная температура θ на глубине 0.5 м (*a*), ее градиенты (*b*), амплитуда сезонного хода AMP (*c*) и ее градиенты (*d*). Обозначения: *GSF* – фронт Гольфстрима, *LF* – Лабрадорского течения, *EGF* – Восточно-Гренландского течения, *AF* – Арктический фронт, *PF* – Полярный фронт, *STF* – Субтропический фронт

Fig. 1. Long-term mean potential temperature θ at a depth of 0.5 m (*a*), its gradients (*b*), amplitude of the seasonal variations AMP (*c*) and its gradients (*d*). Notations: *GSF* – Gulf Stream Front, *LF* – Labrador Current Front, *EGF* – East-Greenland Current Front, *AF* – Arctic Front, *PF* – Polar Front, *STF* – Subtropical Front

и Норвежского, переносящих теплые воды из более южных широт в северные, и северных течений – Восточно-Гренландского, Западно-Гренландского и Лабрадорского, переносящих холодные воды из Северного Ледовитого океана в Атлантический. Фронты вдоль этих течений присутствуют в течение всего года. Максимальные значения градиентов наблюдаются во фронте Гольфстрима [13]. Здесь в среднем за год значения градиентов составляют от 4 до 10 °C/100 км (рис. 1, *b*).

В районах берегового апвеллинга вдоль африканского побережья и экваториального апвеллинга в восточной части экватора среднегодовые значения градиентов во фронтальных зонах составляют около $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$. В Субтропическом фронте градиенты не превышают $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$. В Атлантическом секторе Арктики в Полярном фронте, в основном проявляющемся летом в период таяния льдов, среднегодовые значения градиентов составляют $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$, а в Арктическом фронте (Ян-Майенский – Порога Мона) они составляют $2\text{--}2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$. Следует учитывать, что реальные значения могут быть выше полученных по данным реанализа, которые являются достаточно сглаженными.

Амплитуда сезонной изменчивости температуры воды. Пространственное распределение амплитуды сезонной изменчивости поверхностной температуры воды имеет хорошо выраженную зональность (рис. 1, *c*). Высокие значения амплитуды сезонного хода температуры наблюдаются в средних широтах, уменьшаясь в северном и южном направлениях. В экваториальной зоне, в Тропической Атлантике и в Арктике размах годового хода температуры минимальный.

При этом в зональном направлении в распределении амплитуды присутствуют выраженные особенности. Область с наиболее высокой амплитудой сезонных изменений температуры, превышающей $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, расположена в западной части океана между 25° и 55° с. ш., сужаясь к востоку до $30^{\circ}\text{--}50^{\circ}$ с. ш. (рис. 1, *c*). Наибольшая амплитуда, достигающая $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, находится в районе ветви Лабрадорского течения, распространяющейся к югу вдоль побережья Канады и США и граничащей с Гольфстримом.

Обширная область с амплитудой сезонной изменчивости температуры, превышающей $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, находится в Атлантическом секторе Арктики. К этой области примыкают Полярный и Арктический фронты. Высокий размах сезонного хода температуры также наблюдается у побережья Африки в районе Канарского апвеллинга и в области экваториального апвеллинга. Полученные результаты соответствуют данным, приведенным в [18].

Пространственные градиенты амплитуды сезонной изменчивости температуры воды. Для того чтобы более точно определить положение областей резких изменений амплитуды годового хода температуры воды, вычислялись градиенты амплитуды (рис. 1, *d*). Высокие значения градиентов разграничивают области с разным диапазоном сезонной изменчивости. Сравнение положения градиентов амплитуды сезонного хода с распределением градиентов температуры показывает, что участки, на которых происходит резкое изменение амплитуды сезонной изменчивости, соответствуют положению крупномасштабных температурных фронтов. Пространственная корреляция между ними составляет 0.93 .

Таким образом, фронтальные зоны находятся в местах, где есть резкий переход от области с высоким диапазоном сезонной изменчивости температуры к области с низким диапазоном. Полученный результат можно определить как свойство фронтальных зон – они являются границами областей с разным диапазоном сезонной изменчивости.

Наибольшие значения градиентов амплитуды сезонного хода отмечаются в районах фронтальных зон узких западных течений, таких как Гольфстрим, Лабрадорское течение, прибрежные ветви Западно-Гренландского и Восточно-Гренландского течений (рис. 1, *d*). В субтропической и тропической зоне градиенты амплитуды невелики, как и значения самой амплитуды (рис. 1, *c, d*).

Изменение амплитуды годового хода температуры воды вдоль разрезов через фронтальную зону Гольфстрима, Субтропического и Арктического фронтов. В качестве примеров рассмотрим изменение амплитуды сезонной изменчивости температуры воды и градиентов температуры на меридиональных разрезах через субтропическую фронтальную зону по 55° з. д., фронтальную зону Гольфстрима по 61° з. д. и Арктический фронт по 0° з. д. (рис. 2, *a – c*). Для расчетов амплитуды использовались значения температуры, предварительно осредненной вдоль разреза в пределах $\pm 0.5^\circ$ от выбранной долготы.

Субтропический фронт. Субтропический фронт (*STF*) или субтропическая зона конвергенции (*STCz*) широкой полосой пересекает субтропический антициклонический круговорот, смещаясь к северу в восточной части океана (рис. 1, *b*). Фронт возникает на границе более холодных вод, переносимых с севера экмановским переносом под действием западных ветров, и теплых вод, переносимых с юга под влиянием пассатов [11].

Градиенты температуры во фронте в области разреза невысокие и в среднем не превышают $0.5^\circ\text{C}/100$ км (рис. 1, *a*). Зимой – весной градиенты увеличиваются, достигая максимума весной (рис. 2, *d*). Летом в результате прогрева воды фронт ослабевает, сужается и зона повышенных градиентов смещается к северу (рис. 2, *d, g*) [11, 13].

Поперек фронта (вдоль меридионального разреза 55° з. д.) амплитуда сезонного хода поверхностной температуры воды меняется незначительно. Севернее фронта амплитуда в точке А (36° с. ш.) составляет 4.2°C , а южнее фронта, в точке В (22° с. ш.), она равна 1.8°C (рис. 3, *a, d*). Между точками А и В изменение амплитуды невелико и составляет около 0.2°C на 1° широты.

Фронтальная зона Гольфстрима. Во фронтальной зоне Гольфстрима (*GSF*) наблюдаются наиболее высокие в Северной Атлантике горизонтальные градиенты температуры, обусловленные высокой разницей температуры между теплыми водами Гольфстрима и холодными водами Лабрадорского течения (рис. 1, *a, b*; 2, *b*). В районе меридионального разреза по 61° з. д. градиенты температуры во фронте увеличиваются зимой (январь – март) до $6^\circ\text{C}/100$ км и уменьшаются летом (июль – август) (рис. 2, *e*) до $3^\circ\text{C}/100$ км вследствие летнего прогрева (рис. 2, *h*).

Амплитуда сезонной изменчивости температуры вдоль разреза уменьшается в южном направлении. В точке А (44° с. ш.), расположенной в холодных водах Лабрадорского течения, она составляет 8.0°C , а в точке В (38.5° с. ш.) южнее фронта амплитуда составляет 4.3°C (рис. 3, *b, e*). Изменение амплитуды относительно расстояния между точками составляет 0.7°C на 1° широты.

Арктический фронт. Арктический фронт (*AF*) расположен между глубоководными бассейнами Норвежского и Гренландского морей (см. рис. 1, *b*), в районе подводных хребтов Ян-Майен, Порога Мона, хребта Книповича [15, 16, 20].

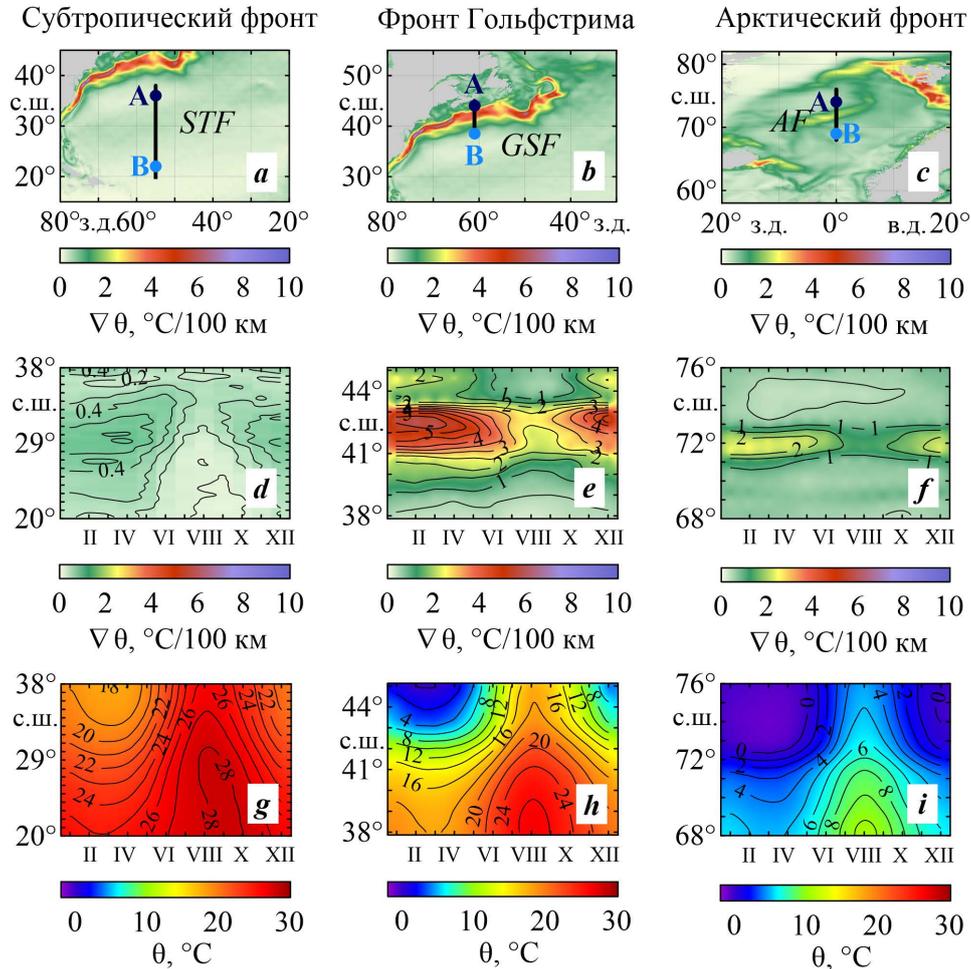


Рис. 2. Положение поверхностных меридиональных разрезов через фронтальные зоны Субтропического фронта (*a*), Гольфстрима (*b*), Арктического фронта (*c*), сезонные изменения горизонтальных градиентов температуры воды (*d–f*) и температуры (*g–i*) вдоль разрезов. Римскими цифрами обозначены месяцы

Fig. 2. Position of surface meridional transects through the frontal zones of the Subtropical Front (*a*), Gulf Stream (*b*), Arctic Front (*c*), seasonal variations of horizontal gradients of water temperature (*d–f*) and temperature (*g–i*) along the transects. Roman numerals denote months

Этот фронт часто разделяют на отдельные элементы – фронтальные зоны: Ян-Майенскую, Порога Мона, Гренландского и Норвежского морей [14]. Фронт разделяет более теплые соленые атлантические воды Норвежского Атлантического фронтального течения (одна из ветвей продолжения Северо-Атлантического течения) и холодные более пресные воды Восточно-Гренландского течения, смешанные с возвратными атлантическими водами, переносимыми Западно-Шпицбергенским течением [15, 21].

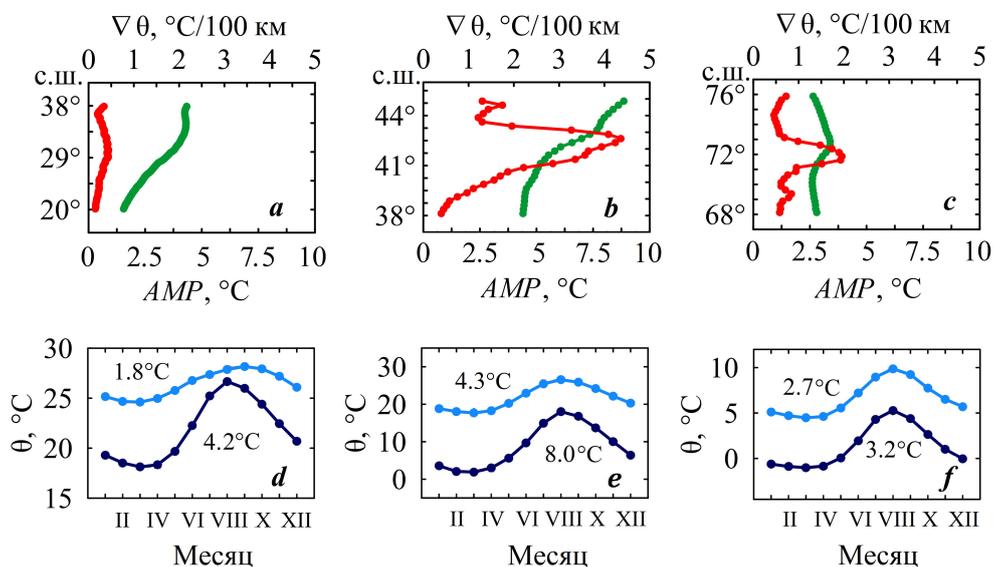


Рис. 3. Амплитуда сезонной изменчивости (зеленые кривые) и градиент (красные кривые) температуры воды (*a – c*), годовой ход температуры воды в точках А и В с холодной (синие кривые) и теплой (голубые кривые) сторон фронта (*d – f*) вдоль меридиональных разрезов через фронтальные зоны Субтропического фронта (*a, d*), Гольфстрима (*b, e*), Арктического фронта (*c, f*). Цифрами указана амплитуда в точках А и В (см. рис. 2)

Fig. 3. Amplitude of seasonal variability (green curves) and gradient (red curves) of water temperature (*a – c*), annual variations of water temperature at points A and B on the cold (dark blue curves) and warm (light blue curves) sides of the front (*d – f*) along meridional transects through the frontal zones of the Subtropical Front (*a, d*), Gulf Stream (*b, e*), and Arctic Front (*c, f*). The figures indicate the amplitude at points A and B (see Fig. 2)

Градиенты температуры воды во фронтальной зоне в области меридионального разреза 0° з. д. увеличиваются до $3^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$ зимой и уменьшаются к лету до $1.5\text{--}2^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$ (см. рис. 2, *f*). Минимальное значение достигается в августе при максимальной температуре воды, составляющей 6°C (см. рис. 2, *i*).

При переходе через этот фронт амплитуда годового хода температуры воды уменьшается от 3.2°C в точке А, расположенной с холодной стороны фронта (74° с. ш.), до 2.7°C в точке В (69° с. ш.) южнее фронта (рис. 3 *c, f*). Изменение амплитуды относительно расстояния между А и В составляет около 0.1°C на градус широты.

На северной границе фронта (73° с. ш.) наблюдается локальный максимум сезонного размаха температуры, а на южной стороне – локальный минимум (рис. 3, *c*). Зимой с северной стороны фронта температура воды уменьшается, в то время как на южной стороне фронта продолжается поступление теплых атлантических вод, что приводит к усилению фронта (см. рис. 2, *f*). Летом вода прогревается и фронт ослабевает. Более высокая разница температур воды с холодной и теплой сторон фронта зимой сопровождается разницей в величине сезонного размаха температуры.

Рассмотренные примеры показывают, что наибольшее изменение амплитуды сезонной изменчивости температуры воды наблюдается во фронтальной зоне Гольфстрима на границе между теплыми водами, поступающими из низких широт, и холодными водами, приходящими с Лабрадорским течением из Арктики. Здесь же отмечаются наиболее высокие градиенты температуры воды (см. рис. 2). Субтропический и Арктический фронты разделяют воды с меньшей разницей в сезонном размахе температуры по сравнению с фронтом Гольфстрима (рис. 2, 3).

Наибольшая разница между температурой воды с холодной и теплой сторон фронта достигается в зимнее время. Зимой с холодной стороны фронта температура понижается сильнее, чем с теплой, что, в свою очередь, сопровождается увеличением градиентов. Летом вследствие сезонного прогрева разница между температурой воды с двух сторон фронта уменьшается и вносит меньший вклад в разницу сезонного хода. Кроме того, летний прогрев сопровождается уменьшением градиентов во фронтальных зонах. Таким образом, в рассмотренных случаях разница в амплитуде сезонного хода с двух сторон фронта в основном связана с зимней разницей температур с холодной и теплой сторон фронта.

Обсуждение

Известно, что формирование океанических фронтов является следствием сложного взаимодействия различных физических и динамических процессов, таких как ветровое воздействие, приводящее к возникновению течений, вертикальному подъему и опусканию вод, пространственно-временная изменчивость потоков тепла на поверхности океана, таяние льдов, сток рек, процессы перемешивания в океане [1, 2, 22]. В разных районах океана могут доминировать разные процессы, сопровождающиеся возникновением температурных и соленостных фронтов.

Сезонная изменчивость перечисленных факторов может приводить к усилению, ослаблению или полному исчезновению фронтов. Летний прогрев ослабляет все температурные фронты, в том числе и вдоль стационарных крупномасштабных течений. Ослабление западных ветров и пассатов летом приводит к ослаблению Субтропического фронта, его сужению и сдвигу к северу.

Перечисленные факторы и их изменчивость, запас тепла в перемешанном слое [22], а также близость берегов влияют на температурные условия с каждой стороны фронта. Так, высокий сезонный диапазон температуры воды с холодной стороны фронта Гольфстрима соответствует высокому сезонному размаху температуры воздуха вдоль побережья Новой Шотландии [18]. При этом следует учесть, что близлежащие материковые районы имеют континентальный климат с низкой температурой зимой и высокой летом [23]. С удалением от умеренных широт к северу и югу амплитуда сезонного хода уменьшается [17, 18] и уменьшается разница между амплитудой по обе стороны фронта, как, например, в Арктическом и Субтропическом фронтах.

Другим аспектом рассмотренного вопроса является замкнутость или обособленность областей, разделенных фронтальными зонами. Так, в работе [1, с. 268] отмечается, что фронтальные разделы – это компоненты сложной трехмерной структуры вод океана, связанные с локальной замкнутостью раз-

личных элементов общей циркуляции. Разница не только значений температуры, но и ее сезонного хода подчеркивает обособленность областей с холодной и теплой сторон фронта.

Важным проявлением обособленности областей с двух сторон фронта являются разные гидрологические и гидрохимические условия обитания морских организмов, видовой состав и разные показатели продуктивности вод [24–27]. Увеличение амплитуды сезонного хода, как правило, указывает на более низкую температуру зимой с холодной стороны океанического фронта (рис. 3, $d - f$), что может сопровождаться преобладанием здесь холодолюбивых видов морских организмов [28].

Заключение

На основе данных океанического реанализа *ORAS5* о температуре на глубине 0.5 м проведено сравнение пространственного положения температурных фронтов и распределения амплитуды годового хода поверхностной температуры воды. Получено, что среднегодовые температурные фронты, являющиеся по определению полосами с высокими градиентами температуры морской воды, кроме этого, являются границами областей с разным диапазоном сезонной изменчивости температуры воды. Разделение океана на области с разной амплитудой сезонного хода можно характеризовать как одно из свойств фронтальных зон. Разница в диапазонах сезонного хода температуры подчеркивает локальную замкнутость областей в океане, разделенных фронтальными зонами.

Наибольшая разница между амплитудами сезонной изменчивости поверхностной температуры воды отмечается в областях, расположенных с двух сторон от фронтальной зоны Гольфстрима. В субполярной, субтропической и тропической зонах фронты разделяют области с меньшей разницей в амплитудах годового хода температуры.

Различие в амплитудах сезонного хода температуры воды с двух сторон фронта Гольфстрима, Субтропического и Арктического фронтов в основном связано с разницей значений температуры с холодной и теплой сторон фронта в зимний сезон. В это время разница между температурой воды с северной холодной и южной теплой сторон фронта увеличивается. Летом вследствие сезонного прогрева разница между значениями температуры воды с двух сторон фронта уменьшается и вносит меньший вклад в величину размаха годового хода.

Полученные результаты могут учитываться в климатических исследованиях, в морской биологии, при анализе метеорологических условий в разных районах океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
2. Belkin I. M., Cornillon P. C., Sherman K. Fronts in large marine ecosystems // Progress in Oceanography. 2009. Vol. 81, iss. 1–4. P. 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2009.04.015>
3. Oceanic fronts and jets around Japan: a review / S. Kida [et al.] // Journal of Oceanography. 2015. Vol. 71. P. 469–497. <https://doi.org/10.1007/s10872-015-0283-7>

4. Life on the edge: marine life and fronts / D. B. Olson [et al.] // *Oceanography*. 1994. Vol. 7, no. 2. P. 52–60. <https://doi.org/10.5670/oceanog.1994.03>
5. *Bakun A.* Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage // *Scientia Marina*. 2006. Vol. 70, suppl. 2. P. 105–122. <https://doi.org/10.3989/scimar.2006.70s2105>
6. *Taylor J. R., Ferrari R.* Ocean fronts trigger high latitude phytoplankton blooms // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38, iss. 23. L23601. <https://doi.org/10.1029/2011GL049312>
7. On the Front Line: frontal zones as priority at-sea conservation areas for mobile marine vertebrates / K. L. Scales [et al.] // *Journal of Applied Ecology*. 2014. Vol. 51, iss. 6. P. 1575–1583. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12330>
8. Satellite data reveal earlier and stronger phytoplankton blooms over fronts in the Gulf Stream region / C. Haëck [et al.] // *Biogeosciences*. 2023. Vol. 20, iss. 9. P. 1741–1758. <https://doi.org/10.5194/bg-20-1741-2023>
9. Global trends of fronts and chlorophyll in a warming ocean / K. Yang [et al.] // *Communications Earth & Environment*. 2023. Vol. 4. 489. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01160-2>
10. *Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А.* Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов Атлантического океана по спутниковым данным // *Исследование Земли из космоса*. 2005. № 4. С. 62–75. EDN HRZZTV.
11. *Ullman D. S., Cornillon P. C., Shan Z.* On the characteristics of subtropical fronts in the North Atlantic // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2007. Vol. 112, iss. C1. C01010. <https://doi.org/10.1029/2006JC003601>
12. *Kazmin A. S.* Variability of the climatic oceanic frontal zones and its connection with the large-scale atmospheric forcing // *Progress in Oceanography*. 2017. Vol. 154. P. 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.poccean.2017.04.012>
13. *Шокурова И. Г., Никольский Н. В., Чернышова Е. Д.* Сезонная изменчивость горизонтальных градиентов в крупномасштабных термохалинных фронтальных зонах в Северной Атлантике // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2024. № 2. С. 23–38. EDN MWVISQ.
14. *Kostianoy A. G., Nihoul J. C. J.* Frontal Zones in the Norwegian, Greenland, Barents and Bering Seas // *Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions*. Dordrecht : Springer Netherlands, 2009. P. 171–190. (NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security).
15. The Arctic Front and its variability in the Norwegian Sea / R. P. Raj [et al.] // *Ocean Science*. 2019. Vol. 15, iss. 6. P. 1729–1744. <https://doi.org/10.5194/os-15-1729-2019>
16. *Ахтямова А. Ф., Травкин В. С.* Исследование фронтальных зон Норвежского моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 1. С. 67–83. EDN IHBIQE. <https://doi.org/10.29039/0233-7584-2023-1-67-83>
17. *Umoh J. U., Thompson K. R.* Surface heat flux, horizontal advection, and the seasonal evolution of water temperature on the Scotian Shelf // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1994. Vol. 99, iss. C10. P. 20403–20416. <https://doi.org/10.1029/94JC01620>
18. *Yashayaev I. M., Zveryaev I. I.* Climate of the seasonal cycle in the North Pacific and the North Atlantic oceans // *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 2001. Vol. 21, iss. 4. P. 401–417. <https://doi.org/10.1002/joc.585>
19. The ECMWF operational ensemble reanalysis-analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment / H. Zuo [et al.] // *Ocean Science*. 2019. Vol. 15, iss. 3. P. 779–808. <https://doi.org/10.5194/os-15-779-2019>

20. Volkov D. L., Belonenko T. V., Foux V. R. Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin—a sub-Arctic hot spot of ocean variability // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40, iss. 4. P. 738–743. <https://doi.org/10.1002/grl.50126>
21. Walczowski W. Frontal structures in the West Spitsbergen Current margins // *Ocean Science*. 2013. Vol. 9, iss. 6. P. 957–975. <https://doi.org/10.5194/os-9-957-2013>
22. Dong S., Kelly K. A. Heat budget in the Gulf Stream region: The importance of heat storage and advection // *Journal of Physical Oceanography*. 2004. Vol. 34, iss. 5. P. 1214–1231.
23. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated / M. Kottke [et al.] // *Meteorologische Zeitschrift*. 2006. Vol. 15, no. 3. P. 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
24. Major nutrients and dissolved oxygen as indicators of the frontal zones in the Atlantic sector of the Southern Ocean / E. Dafner [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C7. 3227. <https://doi.org/10.1029/1999JC000288>
25. Børshheim K. Y., Milutinović S., Drinkwater K. F. TOC and satellite-sensed chlorophyll and primary production at the Arctic Front in the Nordic Seas // *Journal of Marine Systems*. 2014. Vol. 139. P. 373–382. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.07.012>
26. Ecological processes at marine fronts: oases in the ocean / E. M. Acha [et al.]. Cham : Springer, 2015. 68 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15479-4>
27. Qu B., Gabric A. J. The multi-year comparisons of chlorophyll and sea ice in Greenland Sea and Barents Sea and their relationships with the North Atlantic Oscillation // *Journal of Marine Systems*. 2022. Vol. 231. 103749. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103749>
28. Evaluating the role of fronts in habitat overlaps between cold and warm water species in the western North Pacific: A proof of concept / R. M. Mugo [et al.] // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2014. Vol. 107. P. 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.11.005>

Поступила 15.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 19.01.2025 г.; принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Шокурова Ирина Геннадьевна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-3150-8603**, **SPIN-код: 7161-7467**, igshokurova@mail.ru

Никольский Николай Викторович, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-3368-6745**, **SPIN-код: 2374-8598**, n.nikolsky@mhi-ras.ru

Чернышова Елена Дмитриевна, старший инженер-исследователь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0009-0005-4607-8190**, **SPIN-код: 5209-9017**, alenaksenzik@rambler.ru

Заявленный вклад авторов:

Шокурова Ирина Геннадьевна – первоначальный текст, обзор литературы, редактирование, анализ и обобщение результатов

Никольский Николай Викторович – проведение расчетов, визуализация, редактирование, анализ и обобщение результатов

Чернышова Елена Дмитриевна – визуализация, обзор литературы, редактирование, анализ и обобщение результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.