

## Сезонная изменчивость горизонтальных градиентов в крупномасштабных термохалинных фронтальных зонах в Северной Атлантике

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

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

\* e-mail: igshokurova@mail.ru

### Аннотация

Рассматривается сезонная изменчивость пространственного распределения и величины горизонтальных градиентов температуры, солёности и плотности в крупномасштабных поверхностных фронтальных зонах в северной части Атлантического океана. Используются среднемесячные данные о температуре и солёности на горизонте 0.5 м океанического реанализа *ORAS5* (1958–2021 гг.). Получено, что высокие градиенты температуры, превышающие  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$ , солёности –  $1\text{ ЕПС}/100\text{ км}$ , плотности –  $1\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}/100\text{ км}$ , наблюдаются в субполярной и умеренной зонах во фронтах вдоль крупномасштабных течений, переносящих теплые солёные воды из южных широт (Гольфстрим, Северо-Атлантическое течение) и холодные воды с низкой солёностью из арктических районов (Лабрадорское течение, Восточно-Гренландское течение). Эти фронты выделяются в течение всего года. Высокие градиенты солёности и плотности также отмечаются летом в тропической зоне во фронте на границе плюма Амазонки, возникающего в результате сезонного стока реки. В указанных пяти фронтальных зонах были выделены области, для которых приводятся количественные оценки сезонной изменчивости градиентов. В субполярной и умеренной зонах максимальные градиенты температуры отмечаются в зимнее время. Прогрев воды в летний сезон сопровождается уменьшением градиентов. Наибольший размах сезонной изменчивости градиентов температуры наблюдается во фронтальных зонах Гольфстрима и Восточно-Гренландского течения. Летом во фронтах субполярных районов происходит повышение градиентов солёности вследствие таяния арктических и материковых льдов и увеличения поступления вод с пониженной солёностью. Во фронтальной зоне Восточно-Гренландского течения, а также на границе плюма реки Амазонки отмечается наиболее высокий размах сезонных изменений градиентов солёности и плотности. В этих районах возрастает вклад солёности в сезонные изменения плотности на поверхности океана.

**Ключевые слова:** фронтальные зоны, горизонтальные градиенты, градиент температуры, градиент солёности, градиент плотности, сезонная изменчивость, Атлантический океан

© Шокурова И. Г., Никольский Н. В., Чернышова Е. Д., 2024



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 государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 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. 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.

## Seasonal Variability of Horizontal Gradients in the North Atlantic Large-Scale Thermohaline Frontal Zones

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

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail: igshokurova@mail.ru

### Abstract

The paper examines seasonal variability in the spatial distribution and magnitude of horizontal gradients of temperature, salinity and density in large-scale surface frontal zones in the North Atlantic Ocean. Monthly average temperature and salinity data at the 0.5 m horizon from the ORAS5 oceanic reanalysis (1958–2021) are used. High gradients of temperature exceeding 2 °C/100 km, those of salinity exceeding 1 PSU/100 km, and those of density exceeding 1 kg·m<sup>-3</sup>/100 km were observed in the subpolar and temperate regions in fronts along large-scale currents carrying warm salty waters from the southern latitudes (Gulf Stream, North Atlantic Current) and cold waters with low salinity from the Arctic regions (Labrador Current, East Greenland Current). These fronts occur throughout the year. High salinity and density gradients are also observed in the tropical summer in the front at the edge of the Amazon River plume, resulting from seasonal river flow. In these five frontal zones, areas were identified for which quantitative estimates of seasonal variability of gradients are provided. In the subpolar and temperate latitudes, maximum temperature gradients are observed in winter. Warming up of water in the summer season is accompanied by a decrease in gradients. The greatest range of seasonal variability of temperature gradients was noted in the frontal zones of the Gulf Stream and the East Greenland Current. In summer, in the fronts of subpolar regions, salinity gradients increase due to the melting of Arctic and continental ice and an increase in the influx of waters with low salinity. In the frontal zone of the East Greenland Current, as well as at the boundary of the Amazon River plume, the highest range of seasonal changes in salinity and density gradients was noted. In these areas, the contribution of salinity to seasonal changes in density at the ocean surface increases.

**Keywords:** frontal zone, horizontal gradients, temperature gradient, salinity gradient, density gradient, seasonal variability, Atlantic Ocean

**Acknowledgements:** the study was carried out under state assignment 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., 2024. Seasonal Variability of Horizontal Gradients in the North Atlantic Large-Scale Thermohaline Frontal Zones. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 23–38.

## Введение

Фронтальные зоны – области в океане, где вследствие переноса вод течениями, стока рек, апвеллингов и других динамических процессов встречаются водные массы с различными физико-химическими и биологическими свойствами [1, 2]. Границы между водными массами характеризуются высокими горизонтальными градиентами температуры, солености, плотности и других характеристик, что позволяет определять положение фронтов [1]. Фронтальные зоны являются районами высокого биоразнообразия, а океанические фронтальные разделы разделяют зоны с различными условиями обитания морских организмов, поэтому анализ изменения характеристик фронтов важен для морской биологии [2–4]. В этом направлении проводится наибольшее число исследований поверхностных фронтальных зон в настоящее время. Кроме того, многолетние изменения характеристик фронтальных зон могут служить индикаторами климатических изменений в океане, проявляющихся по-разному в разные сезоны, что обуславливает важность их изучения [1, 5, 6].

Исследование процессов во фронтальных зонах началось еще в середине XX в. [1, 7], однако появление в конце столетия спутниковых данных, данных дрейфующих буев и создание современных океанических реанализов расширило возможности исследования фронтов в океане [8]. Эти данные позволили изучать фронты на различных временных и пространственных масштабах [1, 6, 9].

В настоящее время характеристики фронтальных зон анализируются на основе спутниковых данных о температуре поверхности океана [10–12], солености [13, 14], уровне моря [15, 16]. Современные океанические реанализы с высоким пространственным разрешением позволяют в комплексе рассматривать пространственно-временные изменения температурных и соленостных фронтальных зон.

Особенности сезонного хода северной части Атлантического океана наиболее изучены для температурных фронтальных зон [17–22]. Поэтому представляет интерес рассмотреть сезонную изменчивость характеристик фронтальных зон в полях солености и плотности. В настоящей работе рассматривается сезонная изменчивость климатических фронтальных зон, связанных с крупномасштабными движениями в океане. Положение фронтов определяется на основе расчетов горизонтальных градиентов температуры, солености и плотности.

Целью работы является комплексное исследование сезонной изменчивости горизонтальных градиентов в полях температуры, солености и плотности в крупномасштабных фронтальных зонах в северной части Атлантического океана.

## Данные и методы исследования

В работе использовались среднемесячные данные океанического реанализа *ORAS5* за 1958–2021 гг. о потенциальной температуре  $\theta$  (°C) и солености  $S$  (ЕПС) на глубине 0.5 м на сетке с пространственным разрешением около 0.25° (до 9 км в полярных районах) [23]. Аномалия потенциальной плотности рассчитывалась на основе значений солености и потенциальной температуры согласно алгоритмам международного уравнения состояния морской воды (*TEOS-10*)<sup>1)</sup>.

---

<sup>1)</sup> The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. UNESCO, 2010. 196 p.

Для определения положения и характеристик фронтальных зон рассчитывались горизонтальные градиенты потенциальной температуры  $\nabla\theta$  ( $^{\circ}\text{C}/100$  км), солености  $\nabla S$  (ЕПС/100 км) и аномалии потенциальной плотности  $\nabla\sigma_{\theta}$  ( $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}/100$  км) для каждого месяца каждого года:

$$\nabla\varphi = \left( \frac{\partial\varphi}{\partial x}, \frac{\partial\varphi}{\partial y} \right), \quad |\nabla\varphi| = \sqrt{\left( \frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial\varphi}{\partial y} \right)^2},$$

где  $\varphi$  – потенциальная температура  $\theta$ , соленость  $S$  или аномалия потенциальной плотности  $\sigma_{\theta}$ . Компоненты вектора градиента вычислялись методом центральных конечных разностей. При расчете  $\frac{\partial}{\partial x}$  учитывалась широта места.

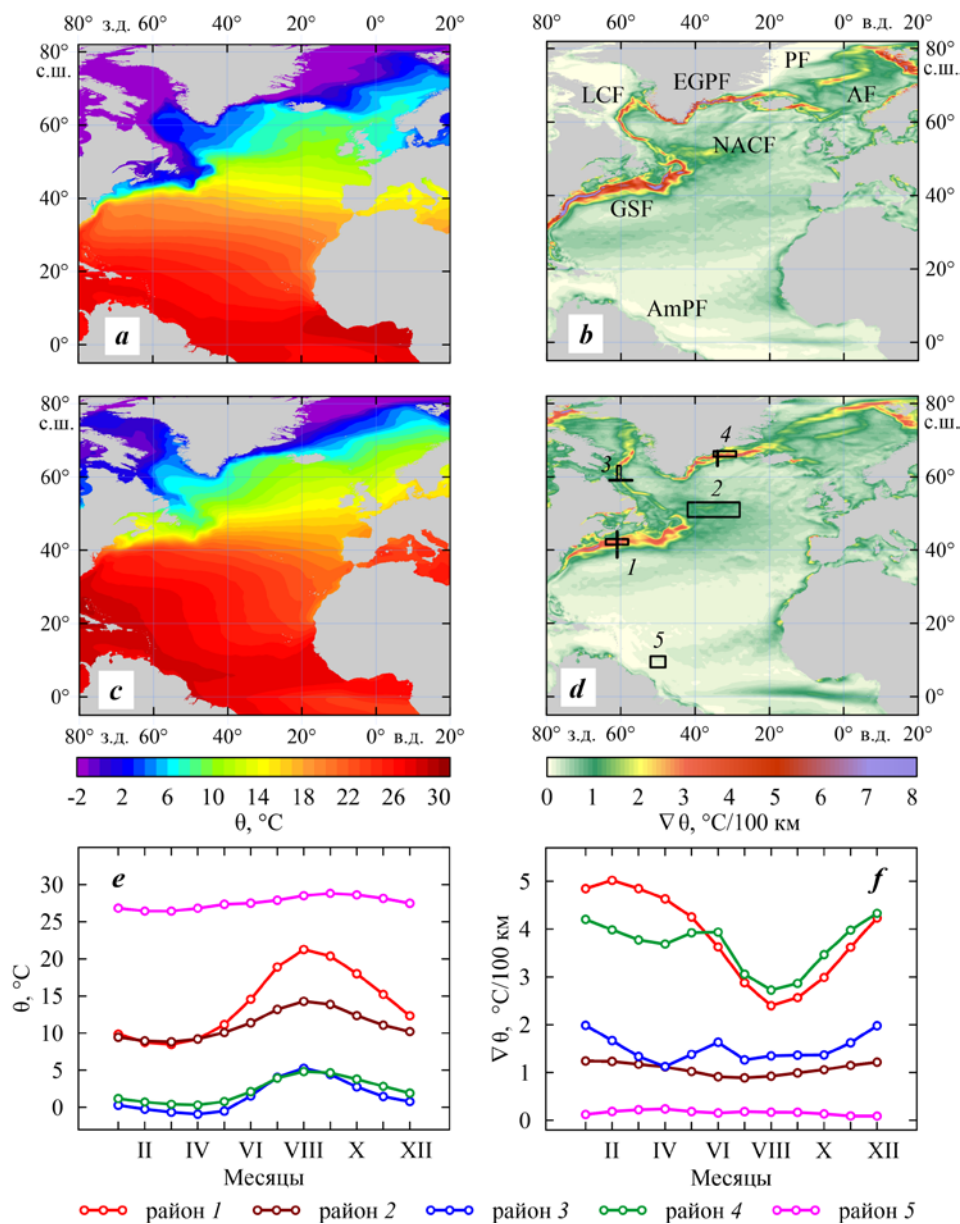
Пространственное распределение термохалинных полей и их градиентов представлено для зимнего (декабрь – февраль) и летнего (июнь – август) сезонов. Количественные оценки сезонной изменчивости градиентов температуры, солености и плотности выполнялись для фронтальных зон с градиентами температуры, превышающими  $2^{\circ}\text{C}/100$  км, солености –  $1$  ЕПС/100 км, плотности –  $1$   $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}/100$  км. Расчеты проводились для пяти отдельных районов, выделенных во фронтальных зонах вдоль крупномасштабных течений и на границе плюма Амазонки. Во фронтальной зоне Гольфстрима был выделен район 1 ( $41.5^{\circ}$ – $43^{\circ}$  с. ш.,  $58^{\circ}$ – $64^{\circ}$  з. д.), Североатлантического течения – район 2 ( $49^{\circ}$ – $53^{\circ}$  с. ш.,  $28^{\circ}$ – $42^{\circ}$  з. д.), Лабрадорского течения – район 3 ( $59^{\circ}$ – $63^{\circ}$  с. ш.,  $60^{\circ}$ – $61^{\circ}$  з. д.); прибрежного Восточно-Гренландского течения – район 4 ( $65.5^{\circ}$ – $67^{\circ}$  с. ш.,  $29^{\circ}$ – $35^{\circ}$  з. д.), плюма реки Амазонки – район 5 ( $8^{\circ}$ – $11^{\circ}$  с. ш.,  $48^{\circ}$ – $52^{\circ}$  з. д.). Термохалинные характеристики осреднялись в пределах границ районов.

Анализ сезонной изменчивости положения и размера фронтальной зоны проводился для районов 1, 3 и 4. На зонально ориентированных участках фронтальных зон Гольфстрима и Восточно-Гренландского течения были выделены меридиональные разрезы вдоль  $61^{\circ}$  и  $34^{\circ}$  з. д. соответственно. На меридионально ориентированном участке фронтальной зоны Лабрадорского течения – зональный разрез вдоль  $59^{\circ}$  с. ш. (рис. 1, *d*). При этом в районах с учащенной сеткой модели значения градиентов были предварительно осреднены с шагом  $0.25^{\circ}$  вдоль разреза.

## Результаты и обсуждение

### *Температурные фронтальные зоны*

В Северную Атлантику с океаническими течениями поступают воды с различными термохалинными характеристиками, что обуславливает наличие океанических фронтов на их границах [1]. Температурные фронтальные зоны на поверхности океана наблюдаются в окрестности всех крупномасштабных течений: Гольфстрима, Лабрадорского, Западно-Гренландского, Восточно-Гренландского, Норвежского, а также в районе прибрежного апвеллинга у западных берегов Африки и летом в восточной части экваториальной области вследствие экваториального апвеллинга (рис. 1).



Р и с . 1. Пространственное распределение потенциальной температуры  $\theta$  (a, c) и ее горизонтальных градиентов  $\nabla\theta$  (b, d) на глубине 0.5 м в зимней (a, b) и летней (c, d) сезоны; сезонная изменчивость средних значений  $\theta$  (e) и  $\nabla\theta$  (f) в районах 1–5. Обозначения: *GSF* – фронтальная зона Гольфстрима, *NACF* – Северо-Атлантического течения, *LCF* – Лабрадорского течения, *EGCF* – Восточно-Гренландского течения, *AmPF* – плюма реки Амазонки; *PF* – Восточно-Гренландский полярный фронт, *AF* – Арктический фронт

Fig. 1. Spatial distribution of potential temperature  $\theta$  (a, c) and its horizontal gradients  $\nabla\theta$  (b, d) at a depth of 0.5 m in winter (a, b) and summer (c, d); seasonal variability of mean values  $\theta$  (e) and  $\nabla\theta$  (f) in areas 1–5. Frontal zones: *GSF* – Gulf Stream, *NACF* – North Atlantic Current, *LCF* – Labrador Current, *EGCF* – East Greenland Current, *AmPF* – Amazon River plume, *PF* – East Greenland Polar Front, *AF* – Arctic Front

Температурная фронтальная зона вдоль течения Гольфстрим выделяется в течение всего года. Она разделяет теплые воды, переносимые Гольфстримом из южных широт, и холодные воды Лабрадорского течения, встречающиеся у берегов Новой Шотландии (рис. 1, *a – d*) [24, 25]. Градиенты температуры в этой фронтальной зоне достигают 13 °C/100 км. В районе 1 зимой градиенты температуры в среднем составляют 4 °C/100 км, максимальные – до 6.5 °C/100 км (рис. 1, *b, f*; таблица). К лету вследствие сезонного увеличения температуры воды в окружающих водах этот фронт ослабевает и градиенты уменьшаются, но остаются достаточно высокими, превышая 2 °C/100 км (рис. 1, *c, d, f*; таблица).

Статистические характеристики градиентов фронтальных зон в районах 1–5

Statistical characteristics of frontal zone gradients in areas 1–5

Значение / Value	Район 1 / Area 1	Район 2 / Area 2	Район 3 / Area 3	Район 4 / Area 4	Район 5 / Area 5
$\nabla \theta, \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ км} /$ $\nabla \theta, \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ km}$					
Среднее / Mean	3.8	1.0	1.5	3.7	0.16
Максимум / Maximum	5.0	1.2	2.0	4.3	0.2
Минимум / Minimum	2.4	0.9	1.1	2.7	0.09
Размах / Range	2.6	0.3	0.9	1.6	0.11
$\nabla S, \text{ ЕПС}/100 \text{ км} /$ $\nabla S, \text{ PSU}/100 \text{ km}$					
Среднее / Mean	1.8	0.22	1.0	1.3	0.8
Максимум / Maximum	2.0	0.24	1.6	2.3	1.7
Минимум / Minimum	1.6	0.19	0.7	0.9	0.2
Размах / Range	0.4	0.05	0.9	1.4	1.5
$\nabla \sigma_\theta, \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}/100 \text{ км} /$ $\nabla \sigma_\theta, \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}/100 \text{ km}$					
Среднее / Mean	0.8	0.15	0.8	0.8	0.6
Максимум / Maximum	1.0	0.22	1.1	1.6	1.3
Минимум / Minimum	0.7	0.1	0.5	0.5	0.2
Размах / Range	0.3	0.12	0.6	1.1	1.1

В районе 2 фронтальной зоны Северо-Атлантического течения в среднем градиенты не превышают  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$ . Их увеличение происходит зимой, а уменьшение летом. Низкие значения градиентов могут быть связаны с разветвлением течения и сезонным смещением ветвей [18].

Лабрадорское и Восточно-Гренландское течения переносят холодные воды в Северную Атлантику из Северного Ледовитого океана. Фронтальные зоны Лабрадорского течения и прибрежного Восточно-Гренландского течения присутствуют во все сезоны. Зимнее понижение температуры в этих районах продолжается до апреля, к лету температура повышается с максимумом в августе (рис. 1, *e*). Максимальные градиенты в районах 3 и 4 отмечаются в декабре – январе, затем уменьшаются от зимы к лету (рис. 1, *f*; таблица). Локальный минимум в апреле соответствует минимальной температуре воды в сезонном цикле. Локальный максимум в июне наблюдается в начале летнего прогрева, когда разница между температурой воды в прибрежной и морской областях еще велика.

Отступление ледовой кромки летом в приатлантической части Арктики приводит к усилению Восточно-Гренландского Полярного температурного фронта [26]. Максимальные градиенты летом здесь достигают  $4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$ . Арктический фронт (Ян-Майенский – Порога Мона [27]), простирающийся от Исландии до Шпицбергена, усиливается зимой и ослабевает летом. Максимальные градиенты температуры в районе фронта наблюдаются зимой и весной и достигают  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$  (рис. 1, *b, d*). Летом градиенты уменьшаются и не превышают  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$ . Такой же порядок величины градиентов приведен в работе [27].

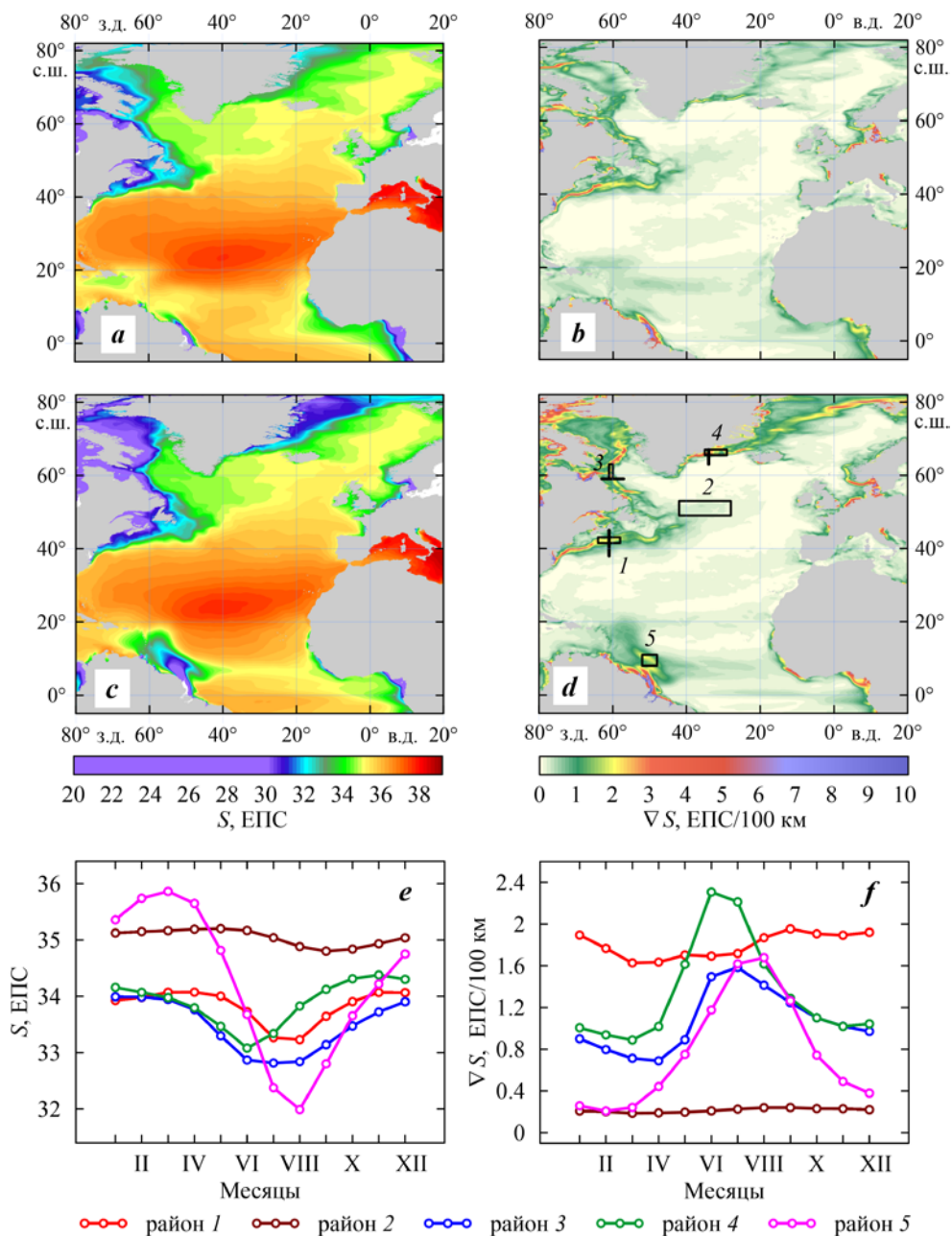
Вдоль побережья Африки зимой и весной апвеллинговая фронтальная зона присутствует южнее  $20^{\circ}$  с. ш., а летом и осенью – севернее  $20^{\circ}$  с. ш., что связано с сезонными изменениями ветрового режима [21]. Градиенты во фронтальной зоне экваториального апвеллинга увеличиваются летом и осенью (рис. 1, *b, d*).

Полученное положение крупномасштабных температурных фронтальных зон и сезонная изменчивость градиентов хорошо соответствуют результатам предыдущих исследований, проведенных по разным видам данных: спутниковым данным о температуре поверхности всего Мирового океана [2, 19], субтропической зоны Северной Атлантики [28], фронта Гольфстрима [6, 20], по данным прямых измерений [17] и данным спутниковой альтиметрии для Северной Атлантики [22].

#### *Соленостные фронтальные зоны*

Соленостные фронтальные зоны с превышающими  $1\text{ ЕПС}/100\text{ км}$  градиентами находятся в районах течений Гольфстрим, Лабрадорского, Восточно-Гренландского, а также Полярного фронта и границы плюма реки Амазонки (рис. 2).

Во фронтальной зоне Гольфстрима наибольшие градиенты солености в течение всего года находятся в районе «северной стены» Гольфстрима [29] (рис. 2, *b, d*). Их значения достигают  $5\text{ ЕПС}/100\text{ км}$  зимой и  $4\text{ ЕПС}/100\text{ км}$  летом. В районе 1 максимальная соленость наблюдается весной [30], градиенты в это время невелики (рис. 2, *e, f*). Высокие градиенты солености отмечаются осенью и зимой, что, вероятно, связано с сезонным усилением транспорта



Р и с . 2 . Пространственное распределение солёности  $S$  ( $a, c$ ) и горизонтальных градиентов солёности  $\nabla S$  ( $b, d$ ) на глубине 0.5 м в зимний ( $a, b$ ) и летний ( $c, d$ ) сезоны; сезонная изменчивость средних значений  $S$  ( $e$ ) и  $\nabla S$  ( $f$ ) в районах 1–5

Fig. 2. Spatial distribution of salinity  $S$  ( $a, c$ ) and horizontal salinity gradients  $\nabla S$  ( $b, d$ ) at a depth of 0.5 m in winter ( $a, b$ ) and summer ( $c, d$ ); seasonal variability of mean values  $S$  ( $e$ ) and  $\nabla S$  ( $f$ ) in areas 1–5



Лабрадорского течения и его ветви, распространяющейся вдоль побережья Новой Шотландии [24, 31, 32], а также с влиянием стока пресных вод из залива Святого Лаврентия [33].

Несмотря на то что Лабрадорское течение усиливается осенью – зимой [31], а Восточно-Гренландское зимой – весной [34], градиенты во фронтальных зонах этих течений (районы 3 и 4) увеличиваются летом, что связано с сезонным таянием арктических льдов и выносом распресненных вод из Северного Ледовитого океана, а также с таянием вдольбереговых и материковых льдов. Минимальные градиенты наблюдаются в марте – апреле при минимальной температуре, после чего значения градиентов растут и достигают максимума в начале лета (рис. 2, *f*; таблица).

В Приатлантической Арктике Восточно-Гренландский полярный соленостный фронт значительно усиливается летом. Это также связано с таянием льдов в Арктике и поступлением распресненных вод, соленость которых значительно ниже по сравнению с соленостью вод субполярных районов [26]. Максимальные значения горизонтальных градиентов солености в летний сезон составляют 3.5 ЕПС/100 км.

В тропической части Атлантического океана присутствует обширная соленостная фронтальная зона на границе плюма реки Амазонки [35]. Весной и летом распресненные воды распространяются Северным Бразильским течением к северу до 15° с. ш. Соленость в районе 5 уменьшается от марта (36 ЕПС) к августу (32 ЕПС), а градиенты увеличиваются от 0.2 до 1.7 ЕПС/100 км. Эти значения соответствуют значениям градиентов солености тропических зон океана, приведенным в [14].

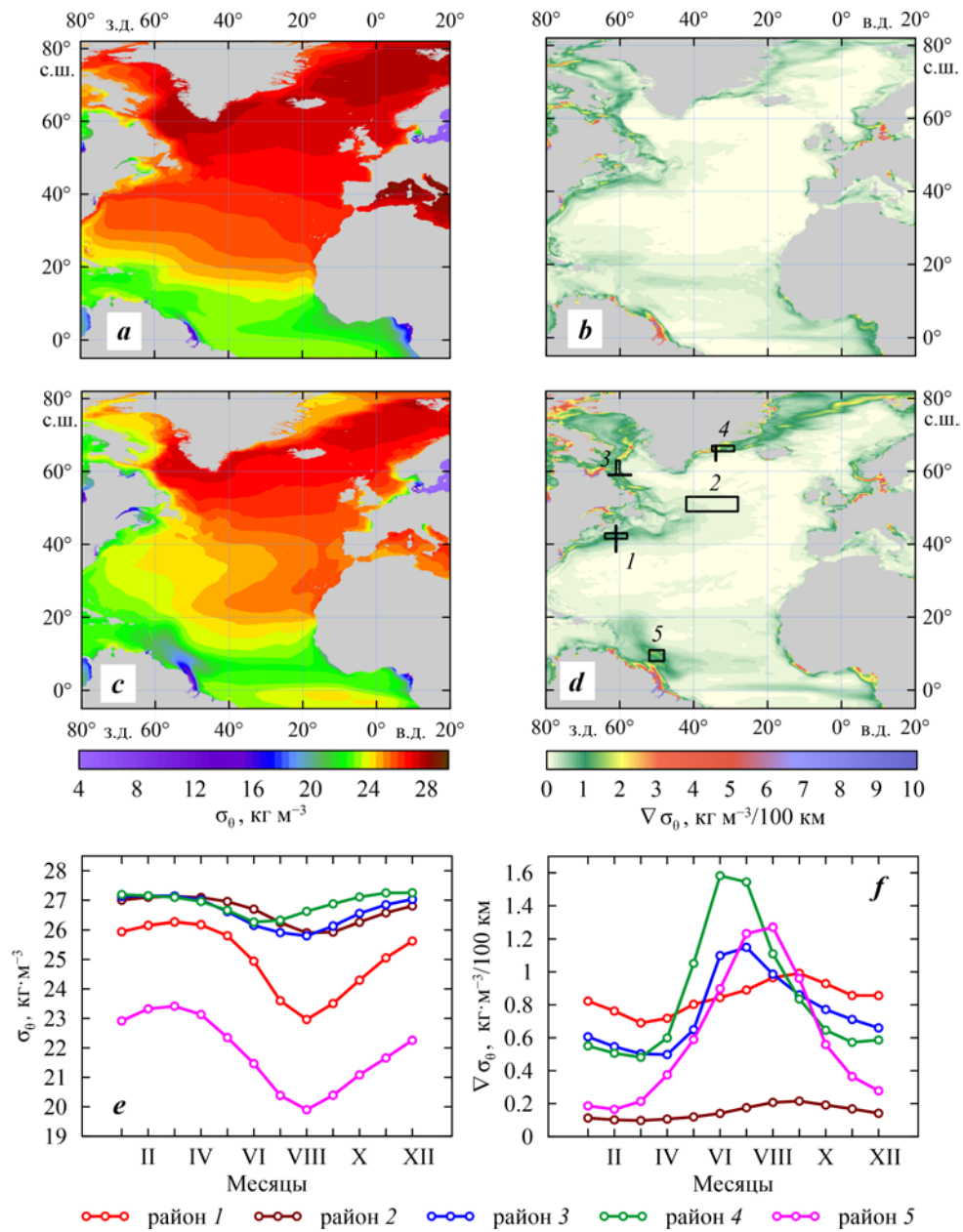
#### *Плотностные фронтальные зоны*

Плотностные фронтальные зоны с превышающими  $1 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}/100 \text{ км}$  градиентами присутствуют в районах течений Гольфстрим, Лабрадорского, Восточно-Гренландского (рис. 3, *b, d*). Летом обширная эстуарная фронтальная зона находится в районе плюма реки Амазонки (рис. 3, *c, d*). Летом вдоль экватора также располагается фронтальная зона, связанная с экваториальным апвеллингом.

В выделенных районах 1–4 плотность во фронтальных зонах уменьшается в летние месяцы, а градиенты плотности в это время увеличиваются (рис. 3, *e, f*). Градиенты, превышающие  $4 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}/100 \text{ км}$ , отмечаются локально на отдельных участках фронтальных зон Лабрадорского течения в районе Девисова пролива, прибрежного Восточно-Гренландского течения, Полярного фронта и в эстуарной зоне Амазонки (рис. 3, *b, d*).

Минимальные градиенты плотности в районах 1–4 фронтальных зон Северной Атлантики наблюдаются в марте. В тропическом районе во фронтальной зоне Амазонского плюма (район 5) минимальный градиент плотности отмечается в феврале.

В районах 1 (фронтальная зона Гольфстрима) и 2 (фронтальная зона Северо-Атлантического течения) минимальные и максимальные значения плотности в сезонном цикле отмечаются при максимальной и минимальной температуре соответственно (рис. 4, *a, b*). Здесь (в открытых частях океана) вклад температуры превышает вклад солености в сезонные изменения плотности.



Р и с . 3 . Пространственное распределение аномалии потенциальной плотности  $\sigma_\theta$  (a, c) и горизонтальных градиентов потенциальной плотности  $\nabla\sigma_\theta$  (b, d) на глубине 0.5 м в зимний (a, b) и летний (c, d) сезоны; сезонная изменчивость средних значений  $\sigma_\theta$  (e) и  $\nabla\sigma_\theta$  (f) в районах 1–5

Fig. 3. Spatial distribution of potential density anomaly  $\sigma_\theta$  (a, c) and horizontal potential density gradients  $\nabla\sigma_\theta$  (b, d) at a depth of 0.5 m in winter (a, b) and summer (c, d) seasons; seasonal variability of mean values  $\sigma_\theta$  (e) and  $\nabla\sigma_\theta$  (f) in areas 1–5

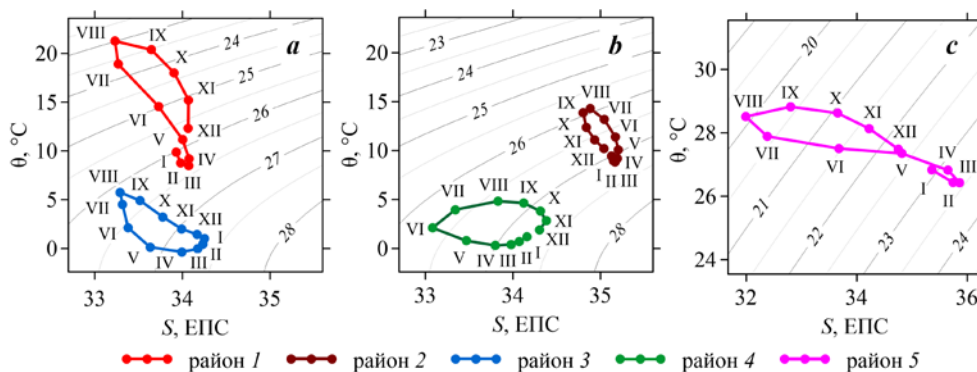


Рис. 4. TS-диаграммы сезонной изменчивости температуры и солёности на глубине 0.5 м в районах 1, 3 (a), 2, 4 (b), 5 (c)

Fig. 4. TS diagrams of seasonal variability of temperature and salinity at a depth of 0.5 m in areas 1, 3 (a), 2, 4 (b), 5 (c)

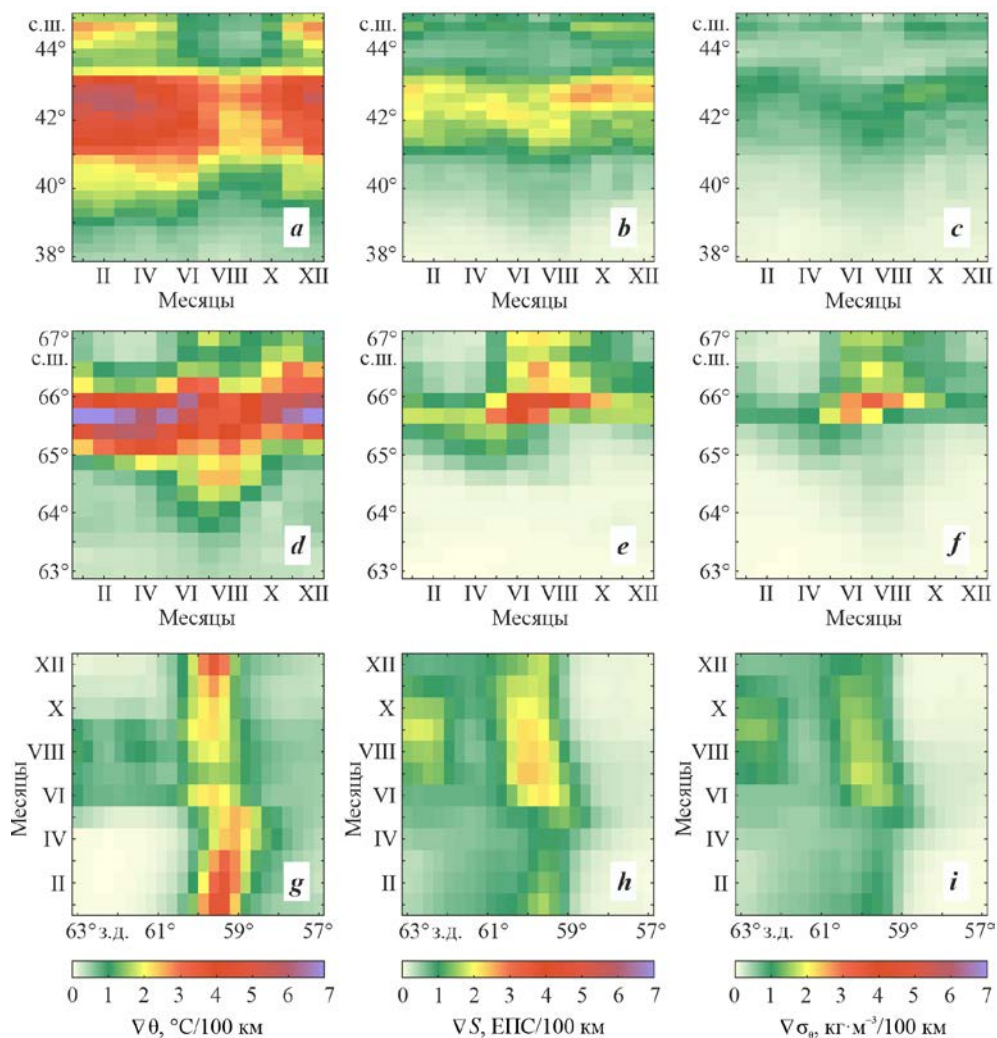
В районах поступления менее солёных вод из Северного Ледовитого океана (Лабрадорское и Восточно-Гренландское течения) и в районе стока реки Амазонки возрастает вклад солёности в сезонные изменения плотности. Это хорошо проявляется в изменениях плотности во фронтальной зоне прибрежного Восточно-Гренландского течения (район 4). Здесь наименьшая плотность достигается в июне при наименьшей солёности, а не при максимальной температуре, которая наблюдается в августе (рис. 4, b). Наибольшая плотность отмечается в ноябре – декабре при высокой солёности. При этом минимальная температура в этом районе наблюдается в апреле. Во фронтальной зоне Лабрадорского течения (район 3) максимальная плотность наблюдается в феврале – марте, в то время как минимальная температура – в апреле.

В районе 5 фронтальной зоны плюма Амазонки максимальная температура наблюдается в сентябре [36], в то время как минимальная плотность получена для августа, когда отмечается минимальная солёность (рис. 4, c).

#### *Сезонная изменчивость размера фронтальных зон*

Сезонные изменения температуры и солёности в течениях и окрестных водах, а также изменения величины речного стока могут приводить к смещениям границ или изменениям размера фронтальной зоны. Так, солёностная и плотностная фронтальные зоны плюма Амазонки (рис. 2, 3) наблюдаются только во время увеличения сезонного стока весной – летом и отсутствуют в зимние месяцы.

Хорошо выражена сезонная изменчивость положения и величины градиентов вдоль меридионального разреза, пересекающего фронтальную зону Гольфстрима по  $61^\circ$  з. д. (район 1). Здесь фронт с градиентами температуры, превышающими  $2^\circ\text{C}/100$  км, сужается в августе – сентябре, при этом градиенты уменьшаются (рис. 5, a). Зона высоких градиентов солёности (более  $2$  ЕПС/100 км) смещается к югу от зимы к лету и обратно к северу осенью (рис. 5, b). Аналогично смещается зона высоких градиентов плотности (рис. 5, c). Отметим, что изменение ширины фронтальных зон, полученное по средне-многолетним данным для отдельных сезонов, может быть связано со смещениями этих зон в отдельные годы.



Р и с . 5 . Сезонная изменчивость градиентов потенциальной температуры  $\nabla\theta$  (*a, d, g*), солёности  $\nabla S$  (*b, e, h*) и аномалии потенциальной плотности  $\nabla\sigma_\theta$  (*c, f, i*) на меридиональных разрезах вдоль  $61^\circ$  з. д. в районе 1 северного участка Гольфстрима (*a, b, c*), вдоль  $34^\circ$  з. д. в районе 4 прибрежного Восточно-Гренландского течения (*d, e, f*) и на зональном разрезе вдоль  $59^\circ$  с. ш. в районе 3 фронтальной зоны Лабрадорского течения (*g, h, i*)

F i g . 5 . Seasonal variability of gradients of potential temperature  $\nabla\theta$  (*a, d, g*), salinity  $\nabla S$  (*b, e, h*) and potential density anomaly  $\nabla\sigma_\theta$  (*c, f, i*) on meridional sections along  $61^\circ$  W in area 1 of the northern section of the Gulf Stream frontal zone (*a, b, c*), along  $34^\circ$  W in area 4 of the East Greenland Coastal Current (*d, e, f*) and on the zonal section along  $59^\circ$  N in area 3 of the Labrador Current frontal zone (*g, h, i*)

В районе 4 фронтальной зоны прибрежного Восточно-Гренландского течения меридиональный разрез был выбран вдоль 34° з. д. Меридиональный размер температурной фронтальной зоны расширяется к югу в июле и августе и к северу в октябре – декабре (рис. 5, *d*). Ширина соленостной и плотностной фронтальных зон увеличивается летом вследствие повышения градиентов на северной границе (рис. 5, *e, f*).

На меридионально направленном участке фронтальной зоны Лабрадорского течения (район 3) был рассмотрен зональный разрез вдоль 59° с. ш. В этом районе зона высоких градиентов (более 2 °C/100 км) смещается к востоку с января по апрель. В мае градиенты уменьшаются и зона смещается к западу (рис. 5, *g*). Градиенты в соленостной (рис. 5, *h*) и плотностной (рис. 5, *i*) фронтальных зонах увеличиваются летом и в начале осени. В это же время зоны смещаются к западу.

### **Заключение**

В настоящей работе на основе использования данных океанического реанализа *ORAS5* о температуре и солености на горизонте 0.5 м дано комплексное представление о положении крупномасштабных поверхностных термических, соленостных и плотностных фронтальных зон в северной части Атлантического океана и сезонной изменчивости их градиентов. Приведены количественные оценки сезонной изменчивости градиентов во фронтальных зонах в отдельных районах крупномасштабных течений и на границе плюма Амазонки.

Анализ сезонной изменчивости пространственного распределения и величин горизонтальных градиентов в термохалинных фронтальных зонах показал следующее. Фронтальные зоны на поверхности океана, расположенные вдоль крупномасштабных течений Гольфстрим, Северо-Атлантического, Лабрадорского и Восточно-Гренландского, переносящих воды, отличающиеся по температуре и солености от окружающих вод, присутствуют в течение всего года. Градиенты температуры в этих зонах уменьшаются от зимы к лету вследствие сезонного прогрева вод. Наибольший размах сезонных изменений градиентов температуры отмечается в районах Гольфстрима и Восточно-Гренландского течения.

Во фронтальных зонах Лабрадорского и Восточно-Гренландского течений наблюдается значительная сезонная изменчивость градиентов солености и плотности. Минимальные градиенты отмечаются в конце зимы – начале весны при минимальной температуре. Градиенты увеличиваются летом вследствие таяния вдольбереговых, материковых и арктических льдов.

В Тропической Атлантике высокая внутригодовая изменчивость градиентов солености и плотности наблюдается во фронтальной зоне Амазонки. Здесь максимальные градиенты отмечаются летом на границе плюма, возникающего вследствие сезонного увеличения стока реки. Зимой фронтальная зона отсутствует.

Полученные оценки сезонных изменений градиентов во фронтальных зонах могут использоваться при изучении биологической продуктивности морских вод. Они также могут учитываться в климатических исследованиях, так как амплитуда сезонного цикла характеристик поверхностного слоя океана, как правило, превышает межгодовые изменения.

#### 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.pocean.2009.04.015>
3. 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>
4. Olson D. B. Biophysical dynamics of ocean fronts // *The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas*. Harvard University Press, 2002. Vol. 12 : Biological-Physical Interactions in the Sea. P. 187–218.
5. 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>
6. Oceanic fronts and jets around Japan: a review / S. Kida [et al.] // “Hot Spots” in the Climate System. Tokyo : Springer, 2016. P. 1–30. [https://doi.org/10.1007/978-4-431-56053-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-4-431-56053-1_1)
7. Cromwell T., Reid Jr. J. L. A study of oceanic fronts // *Tellus*. 1956. Vol. 8, iss. 1. P. 94–101. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v8i1.8947>
8. Ferrari R. A frontal challenge for climate models // *Science*. 2011. Vol. 332, no. 6027. P. 316–317. <https://doi.org/10.1126/science.1203632>
9. Submesoscale fronts in the Antarctic marginal ice zone and their response to wind forcing / S. Swart [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2020. Vol. 47, iss. 6. e2019GL086649. <https://doi.org/10.1029/2019GL086649>
10. Fronts in the Southern Indian Ocean as inferred from satellite sea surface temperature data / A. G. Kostianoy [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2004. Vol. 45, iss. 1–2. P. 55–73. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2003.09.004>
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 BSJBNO. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-6-679-693>
12. Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В. Климатическая структура динамических и температурных фронтов в море Скоша и прилегающих акваториях // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 2. С. 127–150. EDN OKWWJW. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-2-127-150>
13. Belkin I. M. Remote sensing of ocean fronts in marine ecology and fisheries // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, iss. 5. 883. <https://doi.org/10.3390/rs13050883>
14. Yu L. Sea surface salinity fronts and associated salinity minimum zones in the tropical ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015. Vol. 120, iss. 6. P. 4205–4225. <https://doi.org/10.1002/2015JC010790>
15. Oceanic fronts in the southern Indian Ocean as inferred from the NOAA SST, TOPEX/Poseidon and ERS-2 altimetry data / A. G. Kostianoy [et al.] // *Gayana (Concepción)*. 2004. Vol. 68, no. 2. P. 333–339. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382004000300003>
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. Сезонная изменчивость горизонтальных градиентов температуры воды в Северной Атлантике / Л. И. Галеркин [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2002. Т. 384, № 4. С. 539–543. EDN BNSEJD.

18. *Miller P. I., Read J. F., Dale A. C.* Thermal front variability along the North Atlantic Current observed using microwave and infrared satellite data // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2013. Vol. 98, part B. P. 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.08.014>
19. *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.pocean.2017.04.012>
20. *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.
21. *Santos A. M. P., Kazmin A. S., Peliz A.* Decadal changes in the Canary upwelling system as revealed by satellite observations: Their impact on productivity // *Journal of Marine Research*. 2005. Vol. 63, iss. 2. P. 359–379.
22. *Новикова Ю. С., Баимачников И. Л.* Сезонная и межгодовая динамика фронтальных зон в Северной Атлантике // *Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития»*. Санкт-Петербург : Химиздат, 2018. С. 496–498.
23. 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>
24. Eddy-resolving in situ ocean climatologies of temperature and salinity in the Northwest Atlantic Ocean / D. Seidov [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. Vol. 124, iss. 1. P. 41–58. <https://doi.org/10.1029/2018JC014548>
25. The northern North Atlantic Ocean mean circulation in the early 21st century / N. Danialt [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2016. Vol. 146. P. 142–158. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.06.007>
26. Spatio-temporal analysis of east Greenland polar front / Y. Liu [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. 943457. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.943457>
27. *Kostianoy A. G., Nihoul J. C. J., Rodionov V. B.* Physical oceanography of frontal zones in the subarctic seas. Amsterdam: Elsevier, 2004. 316 p. (Elsevier Oceanography Series ; Vol. 71).
28. *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>
29. *Taylor A. H., Stephens J. A.* The North Atlantic Oscillation and the latitude of the Gulf Stream // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 1998. Vol. 50, iss. 1. P. 134–142. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v50i1.14517>
30. Surface and bottom temperature and salinity climatology along the continental shelf off the Canadian and U.S. East Coasts / B. Richaud [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2016. Vol. 124. P. 165–181. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.06.005>
31. Seasonal variability of the Labrador Current and shelf circulation off Newfoundland / G. Han [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008. Vol. 113, iss. C10. <https://doi.org/10.1029/2007JC004376>
32. Interannual surface salinity on Northwest Atlantic shelf / S. A. Grodsky [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122, iss. 5. P. 3638–3659. <https://doi.org/10.1002/2016JC012580>
33. *Ohashi K., Sheng J.* Influence of St. Lawrence River discharge on the circulation and hydrography in Canadian Atlantic waters // *Continental Shelf Research*. 2013. Vol. 58. P. 32–49. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.03.005>

34. Seasonal variability of the East Greenland Coastal Current / S. Bacon [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2014. Vol. 119, iss. 6. P. 3967–3987. <https://doi.org/10.1002/2013JC009279>
35. Amplified seasonal cycle in hydroclimate over the Amazon river basin and its plume region / Y. C. Liang [et al.] // Nature Communications. 2020. Vol. 11. 4390. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18187-0>
36. Yu L., Jin X., Weller R. A. Role of net surface heat flux in seasonal variations of sea surface temperature in the tropical Atlantic Ocean // Journal of Climate. 2006. Vol. 19, iss. 23. P. 6153–6169. <https://doi.org/10.1175/JCLI3970.1>

Поступила 13.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 15.03.2024 г.; принята к публикации 27.03.2024 г.; опубликована 25.06.2024 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](mailto: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](mailto:n.nikolsky@mhi-ras.ru)

**Чернышова Елена Дмитриевна**, 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](mailto:alenaksenzik@rambler.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

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

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

**Чернышова Елена Дмитриевна** – визуализация, первоначальный текст, обзор литературы, анализ и обобщение результатов

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*