

## Исследование фронтальных зон Норвежского моря

А. Ф. Ахтямова ✉, В. С. Травкин

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия  
✉ avellinnaa@gmail.com

Поступила в редакцию 19.08.22; одобрена после рецензирования 05.10.2022;  
принята к публикации 08.11.2022.

### Аннотация

**Цель.** Фронтальные зоны представляют собой области повышенных горизонтальных градиентов физических, химических и биологических параметров, оказывающие существенное влияние на динамику Мирового океана. Целью данной работы является исследование фронтальных зон в Норвежском море в поле температуры, солености и уровня морской поверхности.

**Методы и результаты.** Используются данные о температуре, солености и уровне морской поверхности реанализа *GLORYS12V1* за 1993–2019 гг., доступного на ресурсе *CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service)*. Выделено пять климатических фронтальных зон в исследуемой акватории, рассчитаны средние и максимальные градиенты в поле температуры, солености, уровня морской поверхности. Построены карты пространственного расположения термохалинных и динамических фронтальных зон, карты повторяемости фронтальных зон. Дается оценка взаимосвязи атмосферных индексов *NAO (North Atlantic Oscillation)* и *AO (Arctic Oscillation)* с временной и межгодовой изменчивостью площадей фронтальных зон. Полученные результаты сравниваются с оценками других авторов.

**Выводы.** Установлено, что в зимний период наблюдаются в среднем более высокие, по сравнению с летним периодом, значения градиентов. Обнаружено, что с увеличением глубины наблюдается смещение фронтальных зон к Лофотенской котловине и к Фарерско-Исландскому порогу. Карты повторяемости фронтальных зон демонстрируют высокие значения (более 50 %) областей с высокими градиентами вблизи Лофотенского вихря, Шпицбергена, хребта Мона и материкового склона Норвегии. Большинство фронтальных зон имеют ярко выраженную сезонную и межгодовую изменчивость. Отмечена отрицательная межгодовая корреляция площадей фронтальных зон с *NAO* и *AO*. Замечено, что сезонная изменчивость имеет высокую положительную корреляцию с *NAO*.

**Ключевые слова:** Норвежское море, фронтальные зоны, сезонная изменчивость, межгодовая изменчивость, *NAO*, индекс *AO*, арктическая осцилляция

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 22-27-00004.

**Для цитирования:** Ахтямова А. Ф., Травкин В. С. Исследование фронтальных зон Норвежского моря // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 1. С. 67–83. EDN INBIQE. doi:10.29039/0233-7584-2023-1-67-83

# Investigation of Frontal Zones in the Norwegian Sea

A. F. Akhtyamova ✉, V. S. Travkin

St Petersburg University, Saint Petersburg, Russia  
✉ avellinnaa@gmail.com

## Abstract

**Purpose.** Frontal zones are the areas of strong horizontal gradients of physical, chemical and biological parameters that have a significant impact on the dynamics of the Global Ocean. The aim of the paper is to study the spatial and vertical distribution (including seasonal and interannual variability) of frontal zones in the Norwegian Sea.

**Methods and Results.** The data on temperature, salinity, sea surface height and velocities from the GLORYS12V1 reanalysis for 1993–2019 available on the CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) resource, were used. Five mesoscale frontal zones in the area under study were identified, and the average and maximum gradients in the temperature, salinity and sea surface height fields were calculated. The maps of spatial distribution of the thermohaline and dynamic frontal zones, and also of the frequency of frontal zones were constructed. The correlation between the atmospheric indices NAO (North Atlantic Oscillation) and AO (Arctic Oscillation), and the temporal and interannual variability of the frontal zone areas was assessed.

**Conclusions.** It is shown that the thermohaline and dynamic gradients observed in winter are on the average higher than those observed in summer. It is found that increase of depth is accompanied by a shift of the frontal zones towards the Lofoten Basin and the Faroe-Iceland threshold. The frontal zones frequency maps demonstrate a high rate ( $\geq 50\%$ ) of the areas with strong gradients near the Lofoten Vortex, Svalbard, the Mohn Ridge and the Norwegian continental slope. The majority of frontal zones are of well pronounced seasonal and interannual variability. A negative interannual correlation is noted between the frontal zones areas and the NAO and AO indices. It is also shown that seasonal variability is in high positive correlation with NAO.

**Keywords:** Norwegian Sea, frontal zones, seasonal variability, interannual variability, NAO index, AO index, arctic oscillation

**Acknowledgments:** The study was supported financially by the Russian Science Foundation, project No. 22-27-00004.

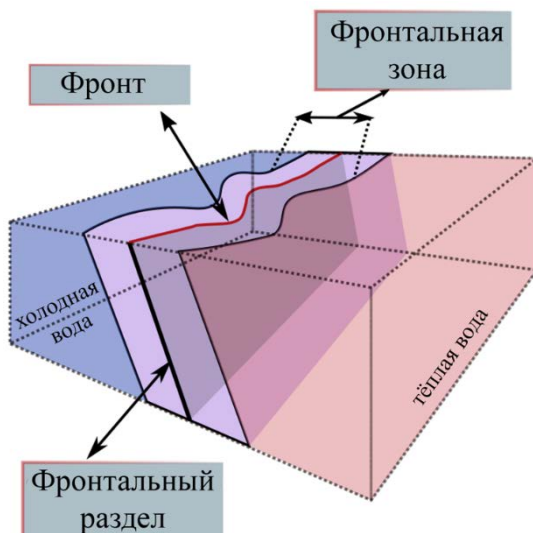
**For citation:** Akhtyamova, A.F. and Travkin, V.S., 2023. Investigation of Frontal Zones in the Norwegian Sea. *Physical Oceanography*, 30(1), pp. 62-77. doi:10.29039/1573-160X-2023-1-62-77

## 1. Введение

Исследование циркуляции вод важно как для развития фундаментальных знаний о природе Мирового океана, так и для решения прикладных задач, связанных с освоением биологических и минеральных ресурсов морских акваторий. В настоящее время наблюдается все больший интерес к океаническим фронтам по следующим причинам: крупномасштабные фронты оказывают существенное влияние на погоду и климат [1], с фронтами связаны различные морские процессы и характеристики, такие как высокая биологическая продуктивность [2–6], интенсивность конвекции, а также высокая скорость струйных течений [7, 8] и др.

Явление фронтотенеза изучено довольно слабо, до сих пор используются различные критерии выделения и терминология. В основу данного исследования были взяты следующие определения: океанический фронт – это след пересечения фронтального раздела с любой выбранной поверхностью, в том числе со свободной поверхностью океана или с любой изопикнической поверхно-

стью <sup>1</sup> (рис. 1). С другой стороны, океанический фронт представляет собой относительно узкую зону усиленных горизонтальных градиентов физических, химических и биологических свойств (температуры, солености, биогенных элементов и т. д.), которая разделяет более широкие области с различной вертикальной структурой (стратификацией) <sup>2</sup>.



**Р и с. 1.** Строение фронтальной зоны в поле температуры  
**Fig. 1.** Structure of the frontal zone in the temperature field

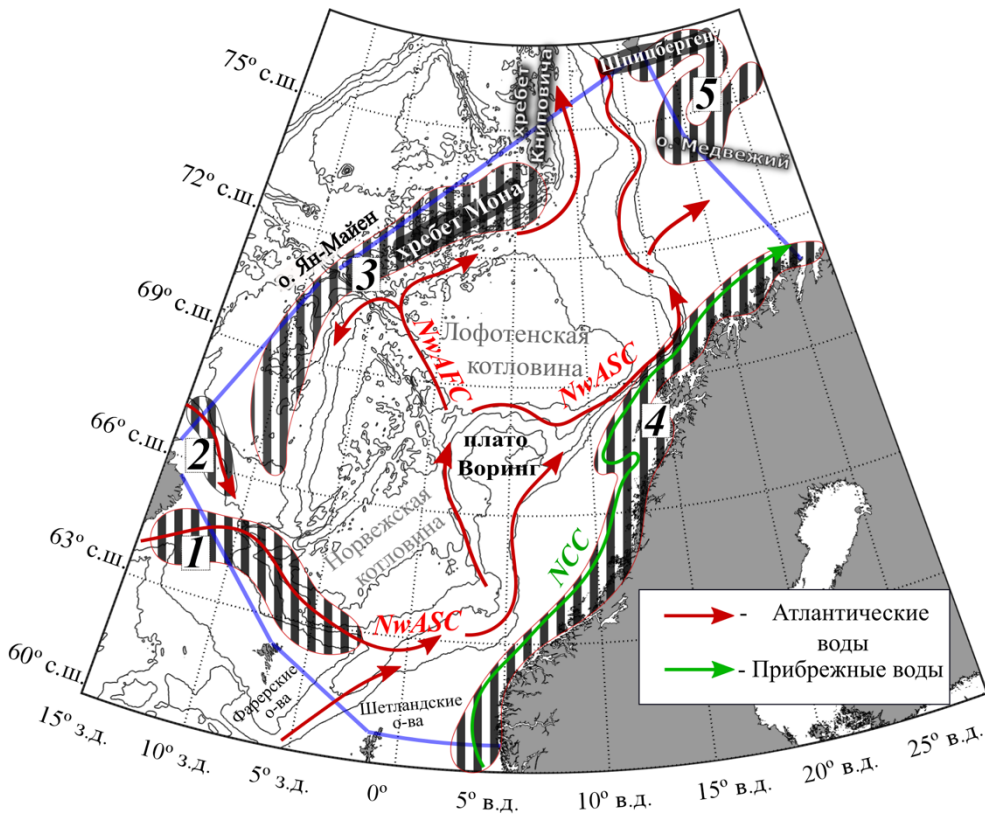
Фронтальные зоны (ФЗ) представляют собой некоторое пространство, в котором происходит взаимодействие различных по своим характеристикам вод <sup>1</sup>. На временную и пространственную эволюцию фронтов существенное влияние оказывают внешние и внутренние факторы [9]. К внешним факторам относятся ветровое воздействие и теплообмен с атмосферой, влияние течений и приливные процессы. Внутренние факторы представлены баротропной и бароклинной неустойчивостью потока.

Норвежское море представляет собой уникальный регион для исследования, так как в нем встречаются воды Атлантического и Северного Ледовитого океанов, и связанные с ними течения имеют фундаментальное значение для глобального климата (рис. 2). Глубоководная часть Норвежского моря представлена двумя крупными котловинами: Норвежской в юго-западной части и Лофотенской в северо-восточной, разделенными между собой плато Воринг и хребтом Хельгеланд (рис. 2). Норвежская котловина имеет сильно изрезан-

<sup>1</sup> Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л. : Гидрометеоиздат, 1983. 296 с. ; Грузинов В. М. Гидрология фронтальных зон Мирового океана. Л. : Гидрометеоиздат, 1986. 272 с.

<sup>2</sup> Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. 296 с. ; Belkin I. M. Front // Interdisciplinary Encyclopedia of Marine Sciences. Danbury, CT : Grolier Academic Reference, 2002. Vol. 1 : A–F. P. 433–435.

ный рельеф с многочисленными подводными горами, ее максимальная глубина превышает 4000 м [10]. В свою очередь, Лофотенская котловина (ЛК) представляет собой плоскую равнину, ограниченную изобатой 3000 м. Она характеризуется локальным максимумом уровня поверхности океана, интенсивным теплообменом с атмосферой, а также высокой энергоактивностью [11–13]. В центре ЛК (примерно на 69,8° с. ш., 3° в. д.) находится квазипостоянная внутритропикноклинная линза – антициклонический Лофотенский вихрь со средним радиусом порядка 37 км [14, 15]. В зимний период глубокая конвекция в ЛК способна превышать 1000 м [16]. Промежуточный слой в центральной части ЛК представлен толстым слоем атлантических вод, что способствует ее превращению в крупнейший тепловой резервуар Северной Атлантики [17, 18].



**Р и с. 2.** Карта исследуемого региона. Зеленым цветом обозначены границы Норвежского моря. Схематически показаны фронтальные зоны (области штриховки), цифрами обозначены: 1 – Исландско-Фарерская ФЗ; 2 – ФЗ Восточно-Исландского течения; 3 – Ян-Майенская (Арктическая) ФЗ; 4 – ФЗ Норвежского прибрежного течения; 5 – ФЗ Западного Шпицбергена. Течения: Норвежское Атлантическое склоновое течение (*NwASC*), Норвежское Атлантическое фронтальное течение (*NwAFC*), Норвежское прибрежное течение (*NCC*) [19, 20]. Изобаты проведены через каждые 700 м

**F i g. 2.** Map of the area under study. Green color shows the Norwegian Sea boundaries. Frontal zones are shown schematically (shaded areas), numbers denote: 1 – Faroe-Iceland FZ; 2 – East-Iceland current FZ; 3 – Jan-Mayen (Arctic) FZ; 4 – Norwegian coastal current FZ; 5 – West Svalbard FZ. Currents: Norwegian Atlantic slope current (*NwASC*), Norwegian Atlantic frontal current (*NwAFC*), Norwegian coastal current (*NCC*) [19, 20]. Isobaths are drawn every 700 m

Норвежское течение представляет собой северную часть меридиональной термохалинной циркуляции [11]. Оно состоит из двух крупных ветвей, имеющих ярко выраженный сезонный цикл [21, 22], движущихся вдоль границ ЛК и переносящих воды Атлантики на север, в Арктический бассейн (рис. 2). С запада ЛК ограничивает Норвежское фронтальное течение (*The Norwegian Atlantic Front Current*, сокр. *NwAFC*), оставляющее с левой стороны хребты Мона и Книповича. В районе Ян-Майена течение разделяется на три рукава: часть его циркулирует по западной окраине Гренландской котловины, другая часть впадает в Исландское море, а третья часть, предположительно самая крупная, уходит в северо-восточном направлении [23]. С востока ЛК ограничивает Норвежское склоновое течение (*The Norwegian Atlantic Slope Current*, сокр. *NwASC*). Вдоль континентального склона располагается Норвежское прибрежное течение (*The Norwegian Coastal Current*, сокр. *NCC*), характеризующееся холодными и сильно опресненными водами.

Исследованию фронтов и ФЗ Норвежского моря посвящено немало публикаций (см. работу <sup>3</sup> и [24–27]), обобщив которые в Норвежском море можно выделить пять климатических ФЗ, относящихся к климатической ФЗ планетарного масштаба – Северной Полярной ФЗ: Исландско-Фарерскую ФЗ; ФЗ Восточно-Исландского течения; Ян-Майенскую (Арктическую) ФЗ; ФЗ Норвежского прибрежного течения; ФЗ Западного Шпицбергена (рис. 2).

Для каждой фронтальной зоны характерна своя конфигурация течений и топографии. Изучение ФЗ Норвежского моря помогает понять структуру климатической крупномасштабной Полярной ФЗ, являющейся важнейшей океанографической чертой, разделяющей атлантические и арктические воды. Установлено, что на состояние ФЗ Норвежского моря существенное влияние оказывают крупномасштабные колебания атмосферы, в частности Североатлантическое колебание (САК, или *North Atlantic Oscillation*, сокр. *NAO*) [20]. Суть *NAO* заключается в перераспределении воздушных масс между Субтропической Атлантикой и Арктическим бассейном [28]. Индекс рассчитывается как разность нормированных аномалий приземного давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом. Положительная фаза *NAO* способствует отрицательным аномалиям температуры поверхности океана (АТПО) в Северо-Атлантическом течении и уменьшению суммарной теплоотдачи из океана в атмосферу. В свою очередь, отрицательная фаза *NAO* характеризуется положительными АТПО в Северо-Атлантическом течении, смещением границы льдов на юг и увеличенными потоками тепла из океана в атмосферу [29]. Уменьшение индекса *NAO* приводит к ослаблению циркуляции в Лофотенской котловине, что в конечном итоге способствует ослаблению Ян-Майенской ФЗ [20].

Индекс Арктической осцилляции (*The Arctic Oscillation*, сокр. *AO*) представляет собой главный компонент первой моды эмпирической ортогональной функции (ЭОФ) среднемесячных аномалий давления на уровне моря в Северном полушарии (20°–90° с. ш.) [30]. Изменчивость *AO* варьируется в диапазоне от нескольких недель до десятилетий и оказывает существенное влияние на

---

<sup>3</sup> Корablёв А. А. Система фронтальных разделов Норвежской ЭАЗО // Исследование роли энергоактивных зон океана в короткопериодных колебаниях климата. М. : ВИНТИ, 1987. С. 380–386. (Итоги науки и техники. Серия: Атмосфера, океан, космос – программа «Разрезы»; т. 8).  
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 39 № 1 2023

состояние атмосферы, климат и температуру морской поверхности [31]. Установлена тесная связь между индексом *AO* и температурой поверхности океана [32]. Как и в случае с индексом *NAO*, для индекса *AO* характерна значимая корреляция с показателем аномалий приземного давления в центре Азорского максимума и Исландского минимума. Положительная фаза *AO* характеризуется интенсификацией полярных и субтропических атлантических воздушных струй и ослаблением тихоокеанских [33]. Отрицательная фаза *AO* способствует увеличению осадков в Восточной Азии [32].

Несмотря на то что изучению фронтальных зон Норвежского моря посвящено достаточно много работ, четкого представления об их пространственной структуре и межгодовой изменчивости по современным данным, к сожалению, нет. В данной работе предпринята попытка проанализировать и количественно оценить пространственно-временную изменчивость термических, халинных и динамических фронтальных зон Норвежского моря за 1993–2019 гг., а также проанализировать взаимосвязь между площадью фронтальных зон и атмосферными индексами *NAO* и *AO*.

## 2. Данные

Продукт *GLORYS12V1*, используемый в данной работе, – это высококачественный реанализ глобального океана с суточной дискретностью и пространственным разрешением  $1/12^\circ$  на 50 вертикальных горизонтах (от 0 до  $-5500$  м). Он основан на глобальной системе прогнозирования *CMEMS* в режиме реального времени. Моделью, задающей океанические условия, выступает *NEMO* с атмосферным форсингом *ECMWF ERA-Interim*. Наблюдения ассимилируются с помощью фильтра Калмана уменьшенного порядка. Размер вырезаемой области:  $60^\circ$  с. ш. –  $77^\circ$  с. ш.,  $15^\circ$  з. д. –  $28^\circ$  в. д.

В данной работе использовались данные о температуре, солености, уровне морской поверхности (*SSH*) за промежуток с января 1993 по декабрь 2019 г.

Данные о батиметрии исследуемого региона были взяты из глобальной модели рельефа поверхности Земли *ETOPO1* (URL: <https://www.ngdc.noaa.gov>). Модель реализована на сетке с пространственным разрешением  $1'$ .

## 3. Методы обработки

Для того чтобы проследить сезонную изменчивость фронтальных зон, с помощью программы *MATLAB R2021b* и данных об уровне морской поверхности, температуре и солености в Норвежском море были построены карты пространственного распределения ФЗ. Обработка данных включала в себя несколько этапов:

1. Из полного массива данных для подавления синоптической изменчивости выделялись средние за три месяца значения температуры, солености, уровня моря за временной промежуток с 1993 по 2019 г. Осреднение данных проводилось для каждого сезона согласно гидрологическим временам года: зимы (январь – март), весны (апрель – июнь), лета (июль – сентябрь) и осени (октябрь – декабрь);

2. Вычислялись градиенты для каждой характеристики (температура, соленость, уровень морской поверхности), определялись среднее и максимальное значения градиента в фронтальной зоне. Для данного расчета

в каждой обнаруженной ФЗ применялось условие выделения ФЗ ко всему рассчитанному массиву данных: для температуры –  $|grad T| \geq 0,02$  °C/км, для солености –  $|grad S| \geq 0,01$  psu/км, для уровня морской поверхности –  $|grad SSH| \geq 0,002$  м/км.

3. Рассчитывалась площадь каждой выделенной ФЗ относительно географического пространства, где эта ФЗ чаще всего проявляется.

Существует большое количество методов идентификации ФЗ, в том числе при помощи альтиметрических данных, а также спутниковых снимков микроволнового, видимого и ИК-диапазонов [34–36]. Авторами были рассмотрены методы детектирования фронтов и фронтальных зон, представленные в работах [37–41]. Среднемноголетние значения температуры и солености в узлах регулярной сетки, полученные для каждого сезона, использовались для расчета горизонтальных градиентов по алгоритму, представленному в работе [38]:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{P_{(i,j+1)} - P_{(i,j-1)}}{2S_x}, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{P_{(i+1,j)} - P_{(i-1,j)}}{2S_y},$$

где  $P$  – значение параметра в узле регулярной сетки;  $S_x$  – шаг расчетной сетки по параллели, км, из-за сходимости меридианов к полюсу  $S_x$  не является постоянной величиной и вычисляется по формуле  $S_x = 1,852 \cdot |\lambda_{(i,j+1)} - \lambda_{(i,j)}| \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{(i+1,j)} + \varphi_{(i-1,j)}}{2}\right)$ ;  $S_y$  – шаг расчетной сетки по меридиану, км, величина постоянная, при расчетах определялся по формуле  $S_y = 1,852 \cdot |\varphi_{(i+1,j)} - \varphi_{(i,j)}|$ , где 1,852 – длина 1-й морской мили; км,  $\varphi$  и  $\lambda$  – широта и долгота узлов расчетной сетки (град, мин).

Модули разностей  $|\lambda_{(i,j+1)} - \lambda_{(i,j)}|$  и  $|\varphi_{(i+1,j)} - \varphi_{(i,j)}|$  значений широты и долготы между узлами сетки вычислялись в географических минутах и переводились в километры.

Итоговый модуль горизонтального градиента рассчитывается по формуле

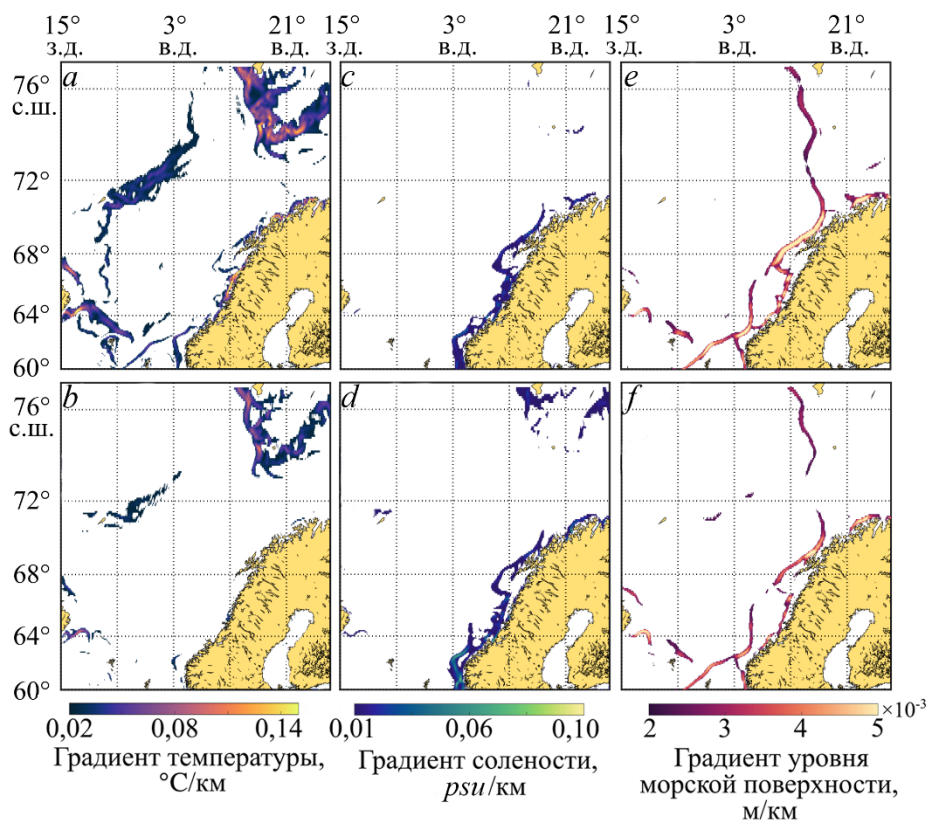
$$|gradP| = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)^2}.$$

Данный способ имеет явную привязку к географическим координатам и помогает сравнить значения градиентов, рассчитанные нами и полученные другими авторами, что в целом определяет используемый алгоритм как популярный и естественный выбор при обработке геоданных.

#### 4. Результаты и обсуждение

##### *Общее описание фронтальных зон*

Авторами были выделены и географически определены пять основных ФЗ в Норвежском море в поле температуры, солености и уровне морской поверхности (рис. 3). Положение фронтальных зон тесно связано с рельефом дна, а также с особенностью циркуляции квазистационарных течений в данном регионе. На основе результатов анализа были сделаны следующие выводы.



**Р и с. 3.** Градиенты температуры,  $^{\circ}\text{C}/\text{км}$  (*a* и *b*), солёности,  $\text{psu}/\text{км}$  (*c* и *d*), и уровня морской поверхности,  $\text{м}/\text{км}$  (*e* и *f*), осредненные за 1993–2019 гг.: *сверху* – зимний период; *снизу* – летний период

**Fig. 3.** Gradients of temperature,  $^{\circ}\text{C}/\text{km}$  (*a* and *b*), salinity,  $\text{psu}/\text{km}$  (*c* and *d*) and sea surface height,  $\text{m}/\text{km}$  (*e* and *f*) averaged over 1993–2019: *on the top* – winter period, *on the bottom* – summer period

Для Исландско-Фарерской ФЗ температурный максимум наблюдается зимой и составляет  $0,20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ , летом наблюдаемые значения меньше в два раза и составляют  $0,11\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Средние значения в поле температуры  $0,034\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ , в то время как в работе <sup>4</sup> они составили  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Для солёности характерен весенний максимум –  $0,08\text{ psu}/\text{км}$ , зимой же ФЗ выражена менее ярко –  $0,04\text{ psu}/\text{км}$ . Длина ФЗ колеблется от 270 км летом до 1150 км зимой. Данная ФЗ является термохалинной, так как отделяет теплые и солёные атлантические воды от трансформированных вод центральной части Норвежского моря <sup>5</sup>, порождая теплые и холодные вихри, ответственные за основной межфронтальный обмен тепла, соли и питательных веществ [26].

<sup>4</sup> *Кораблёв А. А.* Система фронтальных разделов Норвежской ЭАЗО // Исследование роли энергоактивных зон океана в короткопериодных колебаниях климата. М. : ВИНТИ, 1987. С. 380–386.

<sup>5</sup> Там же.



ФЗ Восточно-Исландского течения не постоянна. Она не образует халинную ФЗ в зимнее время года, но летом проявляется довольно интенсивно, максимальный градиент составляет  $0,084 \text{ psu}/\text{км}$ . Температурный максимум наблюдается в осеннее время года и доходит до  $0,137 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$ . Длина колеблется от 170 км летом до 340 км зимой. В поле температуры ФЗ интенсивнее в зимне-весенний период (средние значения внутри ФЗ достигают  $0,039 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$ ), а в поле солёности – в весеннее время года ( $0,019 \text{ psu}/\text{км}$ ). ФЗ является термохалинной.

Арктическая ФЗ также не постоянна. Значения градиентов солёности близки к нулю зимой (ФЗ отсутствует), а летом достигают  $0,033 \text{ psu}/\text{км}$ , что является малым значением относительно других ФЗ в исследуемом регионе. Согласно работе А. А. Кораблева и статье [42], градиент в Арктической ФЗ составляет  $0,01 \text{ psu}/\text{км}$ . Данная ФЗ также имеет самые низкие значения градиентов температуры относительно других ФЗ. Максимум достигается весной –  $0,083 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$ , минимум летом –  $0,056 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$ . Полученные средние значения градиентов немного меньше, чем в работе [20]:  $0,03 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$  против  $0,04 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$ . Зона отличается большими пространственными размерами: длина достигает 1380 км, а средняя ширина 190 км. ФЗ является в большей мере термической ФЗ, редко – халинной. Положение этого фронта и летом, и зимой хорошо коррелирует с положением хребта Мона. Интересен также факт, что выделяемый в пределах Ян-Майенской ФЗ фронт в иностранной литературе носит название *Arctic front* (Арктический фронт). Он простирается от Исландско-Фарерского плато до хребтов Мона и Книповича [42–45] и связан с взаимодействием теплых и солёных атлантических вод с холодными и более пресными арктическими водами [42–45].

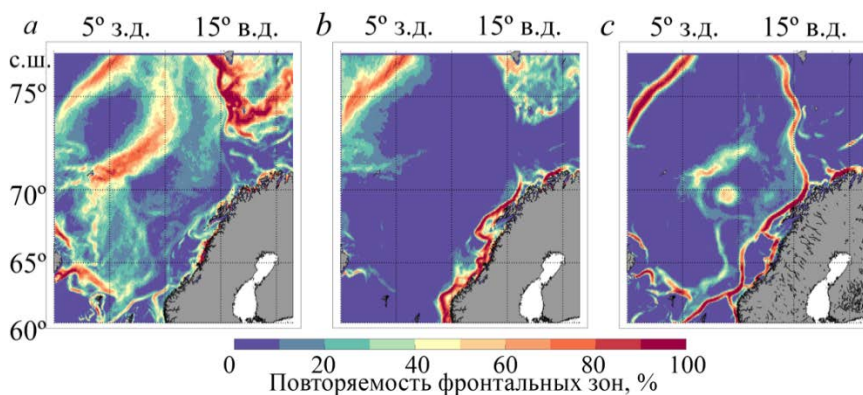
ФЗ Норвежского прибрежного течения выражена ярко в летне-осеннее время в поле солёности вследствие стока рек, таяния ледников и общей циркуляции. ФЗ связана с изменением солёности, которое влияет на поле плотности как летом, так и зимой. Здесь наблюдается максимальный градиент солёности во всем Норвежском море и составляет  $0,487 \text{ psu}/\text{км}$  осенью, но интенсивнее ФЗ выражена летом (средние значения летом –  $0,023 \text{ psu}/\text{км}$ ). В поле температуры наибольшая интенсивность наблюдается в осеннее время года и достигает  $0,05 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$ . Данная ФЗ отличается своей длиной (до 2300 км), так как простирается вдоль всего побережья Норвегии. Ширина на отдельных участках также велика и доходит до 330 км в поле солёности. ФЗ является термохалинной.

ФЗ Западного Шпицбергена ярко выражена как в зимнее, так и в летнее время. Она сильно меандрирует и имеет множество фронтов. Температурный максимум наблюдается весной и достигает  $0,25 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$ . Градиент солёности ярче выражен в летнее время года и составляет  $0,058 \text{ psu}/\text{км}$ . Зимой максимальная длина доходит до 1350 км, ширина до 180 км. ФЗ также является термохалинной. Обусловлена взаимодействием вод атлантического происхождения с проникающими из Баренцева моря шельфовыми водами архипелага Шпицберген [24].

Динамические фронтальные зоны во многом связаны с донной топографией и расположением стрежней основных ветвей Норвежского течения (рис. 3, *e* и *f*). Их распределение сильно сходно с месторасположением ярко выраженных термических и халинных ФЗ, например, Исландско-Фарерской.

Сезонная изменчивость не характерна для выделения такого типа фронтальных зон и заметна лишь в Ян-Майенской ФЗ.

На рис. 4 показана повторяемость ФЗ в поле температуры, солености и уровня морской поверхности за 1993–2019 гг. ФЗ Западного Шпицбергена характеризуется наибольшей повторяемостью в поле температур (~ 90–100 %) среди всех ФЗ. В поле солености ярче всего выделяется Прибрежная ФЗ, так как здесь проходит *НСС*, несущее значительно опресненные воды, источником которых является солоноватый сток из Балтийского моря, а также сток из норвежских фьордов. Обратную картину в поле солености мы видим для Арктической ФЗ: повторяемость в отдельных местах достигает до 30 % (ФЗ находится на значительном расстоянии от суши). В поле уровня повторяемость более 50 % встречается в узкой области стрежней Норвежского течения и в районе ЛВ (рис. 4, *с*). Самой стабильной фронтальной зоной можно назвать Исландско-Фарерскую ФЗ, так как она выражена ярко во всех трех исследуемых характеристиках. Найденные для этой ФЗ значения сходны с результатами, полученными на основе использования спутниковых данных [34].



**Р и с. 4.** Повторяемость фронтальных зон, %, в поле температуры (*a*), солености (*b*) и уровня морской поверхности (*c*) за 1993–2019 гг.

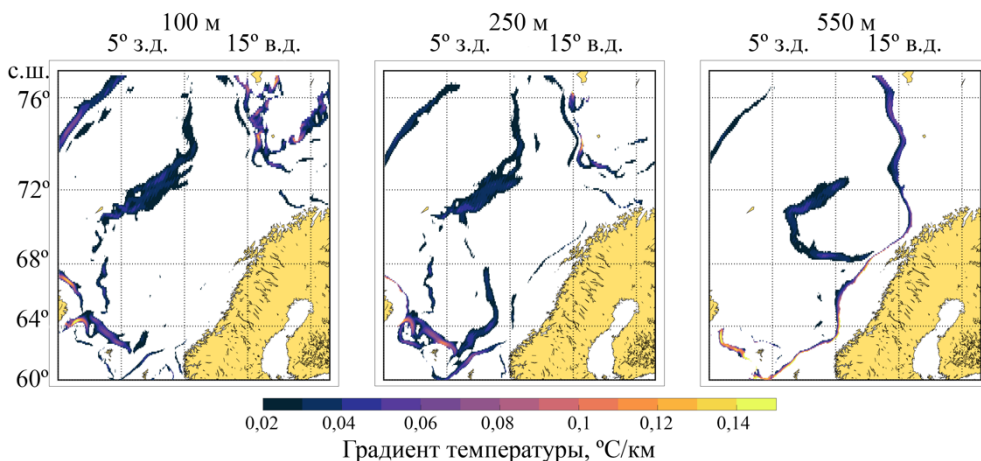
**F i g. 4.** Frequency of the frontal zones, (%), in the temperature (*a*), salinity (*b*) and sea surface height (*c*) fields over 1993–2019

При рассмотрении градиентов термохалинных характеристик с увеличением глубины (рис. 5) было обнаружено, что глубина залегания фронтальных зон в данной акватории варьируется в больших диапазонах. Встречаются как приповерхностные ФЗ (залегают до глубины шельфа), так и фронтальные зоны, охватывающие всю толщу вод до главного пикноклина (около 700–1000 м). Большие (более 1000 м) глубины присутствия зон высоких градиентов не были обнаружены.

Для данной акватории с увеличением глубины характерно появление других фронтальных зон, не проявляющихся в поверхностном слое океана (например, Прибрежно-склоновой ФЗ, которая простирается вдоль изобаты 500 м, начиная с глубин ~ 300 м), и ФЗ Лофотенского вихря), где каждая образованная ФЗ обусловлена системой течений, топографией дна, а также общим взаимодействием холодных и опресненных вод Арктики с теплыми и солеными

водами Северо-Атлантического течения. Тем не менее наибольшей площадью фронтальных зон характеризуется горизонт 50 м. Переходной границей положения ФЗ является глубина ~ 350 м.

С увеличением глубины фронтальные зоны в поле температуры уменьшаются в своих размерах и концентрируются ближе к границам Лофотенской котловины (рис. 5). В поле солености наблюдается две ФЗ: фронтальная зона Норвежского прибрежного течения, глубина залегания которой достигает примерно 150 м, и Исландско-Фарерская ФЗ с характерной глубиной залегания ~ 250 м (примерно до глубины шельфа).



**Р и с. 5.** Пространственное распределение рассчитанных градиентов в поле температуры в 1993–2019 гг. на глубинах 100, 250 и 550 м

**F i g. 5.** Spatial distribution of the calculated gradients in the temperature field at the 100, 250 and 550 m depths in 1993–2019

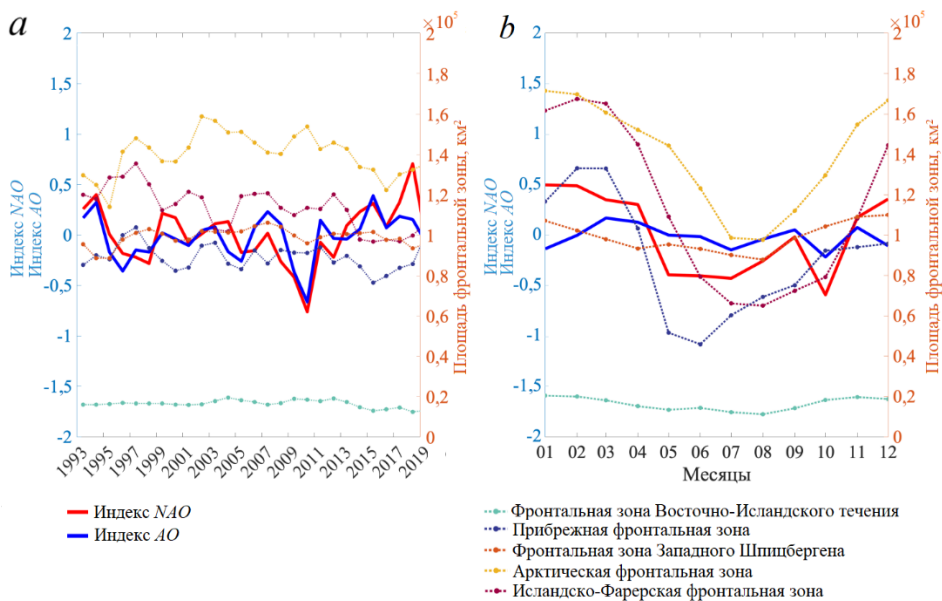
Почти каждая фронтальная зона с увеличением глубины имеет более высокие градиенты температур (как максимальные, так и средние значения). Это может быть связано с интенсивным перемешиванием в приповерхностном слое, чего нельзя сказать о промежуточном слое (глубины более 400 м), в котором теплое Норвежское течение встречается с арктическими водами. Интересной в этом плане является Исландско-Фарерская ФЗ, на поверхности которой градиенты температуры достигают до  $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ , а на глубине 550 м составляют  $0,59\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ .

Анализ полученных данных показал, что с глубиной главную роль в динамике ФЗ играет температура, градиенты которой резко увеличиваются и могут быть на порядок выше, чем на поверхности. Наблюдается смещение фронтальных зон к Лофотенской котловине и к Фарерско-Исландскому порогу.

#### *Сезонная и межгодовая изменчивость*

На рис. 6, а показана межгодовая изменчивость площадей ФЗ и атмосферных индексов. Можно заметить, что наблюдается отрицательная межгодовая корреляция площадей Исландско-Фарерской и Восточно-Исландской ФЗ с атмосферным индексом *NAO*, равная  $-0,44$  и  $-0,51$  соответственно (таблица).

Остальные ФЗ имеют менее выраженную отрицательную корреляцию площади с *NAO*. Так, значения корреляции для Арктической и Прибрежной ФЗ, а также ФЗ Западного Шпицбергена равны  $-0,36$ ,  $-0,27$  и  $-0,19$  соответственно. Корреляция площади исследуемых ФЗ с индексом *AO* менее выражена по сравнению с индексом *NAO* (таблица). Она минимальна для Прибрежной ФЗ, тогда как для ФЗ Западного Шпицбергена она положительна, хотя и близка к нулю. Для Арктической, Исландско-Фарерской и Восточно-Исландской ФЗ корреляция с *AO* выражена сильнее и составляет  $-0,27$ ,  $-0,32$  и  $-0,44$  соответственно. Стоит отметить, что между исследуемыми ФЗ наблюдается существенный разброс значений корреляции. Для некоторых ФЗ, в частности для ФЗ Западного Шпицбергена и Прибрежной, корреляция незначительна как с индексом *NAO*, так и с индексом *AO*. С другой стороны, для Арктической, Исландско-Фарерской и Восточно-Исландской ФЗ значения корреляции как с индексом *NAO*, так и с индексом *AO* больше, что может указывать на тесную связь между этими характеристиками крупномасштабной атмосферной циркуляции. Отрицательная межгодовая корреляция между площадью ФЗ и индексами *NAO* и *AO* описана в работе [43] и связана с поступлением и дальнейшим распределением атлантических вод в Норвежском море.



**Р и с. 6.** Межгодовая и сезонная изменчивость площадей фронтальных зон и индексов *NAO* и *AO*

**F i g. 6.** Interannual and seasonal variability of the frontal zone areas and the *NAO* and *AO* indices

Для Исландско-Фарерской и Прибрежной ФЗ характерны существенные отрицательные значения межгодового тренда, равные  $-988$  и  $-196$  км<sup>2</sup>/год (таблица). С меньшей скоростью происходит уменьшение Восточно-Исландской и Арктической ФЗ ( $-86$  и  $-27$  км<sup>2</sup>/год соответственно), тогда как для ФЗ Западного Шпицбергена характерен положительный межгодовой тренд ( $96$  км<sup>2</sup>/год).

**Рассчитанные корреляции между площадью ФЗ и индексами *AO* и *NAO*,  
а также значения сезонного и межгодового тренда  
Calculated correlations between the FZ areas and the *AO* and *NAO* indices,  
and values of the seasonal and interannual trends**

Фронтальные зоны / Frontal Zones	Корреляция / Correlation				Тренд / Trends	
	сезонная / seasonal		межгодовая / intrannual			
	<i>NAO</i>	<i>AO</i>	<i>NAO</i>	<i>AO</i>	сезонный, км <sup>2</sup> /месяц / seasonal, km <sup>2</sup> /month	межгодовой, км <sup>2</sup> /год / interannual, km <sup>2</sup> /year
Исландско-Фарерская / Iceland-Faroe	0,87	0,33	-0,44	-0,32	-6410,30	-988,41
Арктическая / Arctic	0,78	0,23	-0,36	-0,27	-2691,50	-27,10
Восточно-Исландская / East-Iceland	0,66	-0,03	-0,51	-0,44	-118,30	-86,11
Прибрежная / Coastal	0,81	0,25	-0,27	-0,05	-3283,75	-196,94
Западного Шпицбергена / West Svalbard	0,50	-0,18	-0,19	0,14	477,00	96,57

Все ФЗ, за исключением ФЗ Западного Шпицбергена, характеризуются отрицательными сезонными трендами (таблица). Наибольшие по модулю значения трендов характерны для Исландско-Фарерской, Прибрежной и Арктической ФЗ, тогда как для Восточно-Исландской ФЗ тренд близок к нулю.

Говоря о сезонной изменчивости (рис. 6, *b*), стоит отметить, что она характерна для большинства ФЗ и имеет слабые колебания лишь в Восточно-Исландской ФЗ и ФЗ Западного Шпицбергена (таблица). В зимний период площадь Арктической и Исландско-Фарерской ФЗ может превышать 160 тыс. км<sup>2</sup>, тогда как площадь Прибрежной, ФЗ Западного Шпицбергена и Исландско-Фарерской ФЗ достигает 130, 110 и 20 тыс. км<sup>2</sup> соответственно. Своего максимального пространственного развития большая часть ФЗ достигает в феврале, тогда как в весенний период происходит их резкое уменьшение. В летний период (чаще всего в июне или в августе) площадь ФЗ минимальна и для Арктической, Исландско-Фарерской и Прибрежной фронтальных зон она равна 100, 65 и 45 тыс. км<sup>2</sup> соответственно (рис. 6, *b*). Минимальная площадь ФЗ Западного Шпицбергена и Восточно-Исландской ФЗ летом достигает 90 и 10 тыс. км<sup>2</sup> соответственно. Рассчитанная сезонная изменчивость площадей ФЗ довольно сходна с колебаниями расхода ветвей Норвежского течения, описанными в работе [21].

Таким образом, площадь Арктической, Исландско-Фарерской и Прибрежной ФЗ может меняться в течение года в 1,6, 2,5 и в 2,9 раза соответственно. В свою очередь, аналогичные параметры для ФЗ Западного Шпицбергена и Восточно-Исландской ФЗ равны 1,2 и 2 раза соответственно.

Говоря об индексе *NAO*, можно заметить, что он максимален в зимний период и достигает 0,5. Затем происходит его резкое уменьшение, к середине весны он достигает нуля, а концу доходит до -0,4 (рис. 6). Летом индекс *NAO*

меняется слабо, начиная увеличиваться лишь к августу. Осенью заметен незначительный рост индекса *NAO*. Стоит отметить, что в сентябре наблюдается существенное уменьшение как индекса *NAO*, так и индекса *AO*. По сравнению с индексом *NAO*, индекс *AO* меняется не так интенсивно по сезонам (рис. 6).

## 5. Выводы

На основе реанализа *GLORYS12V1* получены пространственные характеристики фронтальных зон Норвежского моря. Впервые даны оценки их повторяемости, сезонной и межгодовой изменчивости за 1993–2019 гг. По этим данным рассчитаны коэффициенты корреляции фронтальных зон с индексами *NAO* и *AO*, а также значения межгодового тренда. Результаты во многом соответствуют оценкам, приводящимся в более ранних исследованиях. Так, Ян-Майенская и другие ФЗ отчетливо прослеживаются на глубинах от 0 до 600 м, что близко с оценками в других работах.

Горизонтальные градиенты температуры во фронтальных зонах близки к аналогичным оценкам в других работах, хоть и могут быть немного ниже. Градиенты в поле солёности имеют меньший разброс.

Индекс *NAO* отчетливо коррелирует с сезонной и межгодовой изменчивостью фронтальных зон, тогда как связь с индексом *AO* менее заметна. Положительные значения корреляции между сезонной изменчивостью площади ФЗ и индексом *NAO* свидетельствуют об уменьшении интенсивности фронтальных зон при отрицательном индексе *NAO*. Данный механизм может быть связан со смещением ядра Норвежского фронтального течения и ослаблением градиентов температуры поперек фронта.

Результаты свидетельствуют о ярко выраженной сезонной и межгодовой изменчивости большинства ФЗ Норвежского моря. В осенне-зимний период происходит резкое увеличение площади фронтальных зон, по своим значениям превосходящее многолетние изменения. Разница между площадью фронтальных зон в летний и зимний период может достигать 2,5–2,9 раза. Для большинства ФЗ характерны отрицательные многолетние линейные тренды, свидетельствующие о долговременном уменьшении их площадей. Сезонные и межгодовые колебания Восточно-Исландской ФЗ и ФЗ Западного Шпицбергена слабо заметны. Для фронтальных зон характерно наличие ярко выраженной вертикальной изменчивости от поверхности до глубин ~ 900 м. С увеличением глубины происходит смещение положения фронтальных зон (вплоть до появления новых, не обнаруженных на поверхности ФЗ), а также рост градиентов температуры и солёности. Данный факт может быть связан с перемешиванием и конвекцией, а также с распространением атлантических вод. Показано, что все ФЗ имеют высокую повторяемость (более 70 %) в поле температуры, тогда как в поле солёности и уровня моря повторяемость увеличивается лишь в районе ЛВ и стречней Норвежского течения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Kostianoy A. G., Nihoul 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, 2009. P. 171–190. doi:10.1007/978-1-4020-9460-6\_13*

2. 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>
3. *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. doi:10.3989/scimar.2006.70s2105
4. “Flashes” of chlorophyll-a concentration derived from in situ and remote sensing data at the Polar Front in the Barents Sea / V. Kushnir [et al.] // *The Open Oceanography Journal*. 2011. Vol. 5. P. 14–21. doi:10.2174/1874252101105010014
5. *Russell R. W., Harrison N. M., Hunt Jr. J. G. L.* Foraging at a Front: Hydrography, Zooplankton, and Avian Planktivory in the Northern Bering Sea // *Marine Ecology Progress Series*. 1999. Vol. 182. P. 77–93. doi:10.3354/meps182077
6. Oceanic Fronts Shape Biodiversity of Gelatinous Zooplankton in the European Arctic / M. K. Manko [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. 941025. doi:10.3389/fmars.2022.941025
7. *Chapman C. C.* Southern Ocean jets and how to find them: Improving and comparing common jet detection methods // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2014. Vol. 119, iss. 7. P. 4318–4339. doi:10.1002/2014jc009810
8. *Orvik K. A., Niiler P.* Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and Nordic Seas toward Arctic // *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 29, iss. 19. 1896. doi:10.1029/2002gl015002
9. *Малинин В. Н., Гордеева С. М.* Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. СПб. : РГТУ, 2009. Том I : Изменчивость факторов среды обитания. 277 с.
10. Topographic experiments over dynamical processes in the Norwegian Sea / T. V. Belonenko [et al.] // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021. Vol. 21. ES1006. doi:10.2205/2020ES000747
11. The Lofoten Basin eddy: Three years of evolution as observed by Seagliders / L.-S. Yu [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122, iss. 8. P. 6814–6834. doi:10.1002/2017jc012982
12. *Баумачников И. Л., Белоненко Т. В., Куйбин П. А.* Приложение теории колоннообразных Q-вихрей с винтовой структурой к описанию динамических характеристик Лофотенского вихря Норвежского моря // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2017. Т. 62, № 3. С. 221–236. doi:10.21638/11701/spbu07.2017.301
13. *Травкин В. С., Белоненко Т. В.* Исследование вихревой изменчивости в Лофотенской котловине на основе анализа доступной потенциальной и кинетической энергии // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 3. С. 318–332. doi:10.22449/0233-7584-2021-3-318-332
14. The Lofoten Vortex of the Nordic Seas / Raj R. P. [et al.] // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2015. Vol. 96. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.10.011>
15. *Травкин В. С., Белоненко Т. В., Кубряков А. А.* Холодное пятно над Лофотенским вихрем // *Исследование Земли из Космоса*. 2022. № 4. С. 25–37. EDN NLWRVS. doi:10.31857/S0205961422040066
16. *Фёдоров А. М., Баумачников И. Л., Белоненко Т. В.* Зимняя конвекция в Лофотенской котловине по данным буев Argo и гидродинамического моделирования // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2019. Т. 64, № 3. С. 491–511. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.308>
17. Evaluation of Heat and Salt Transports by Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin / T. V. Belonenko [et al.] // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. Vol. 6. ES6011. doi:10.2205/2020ES000720
18. *Новоселова Е. В., Белоненко Т. В.* Изопикническая адвекция в Лофотенской котловине Норвежского моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 3. С. 56–67. doi:10.7868/S2073667320030041

19. Volkov D. L., Kubryakov A. A., Lumpkin R. Formation and Variability of the Lofoten Basin Vortex in a High-Resolution Ocean Model // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2015. Vol. 105. P. 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.09.001>
20. 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. doi:10.5194/os-15-1729-2019
21. Mork K. A., Skagseth Ø. A quantitative description of the Norwegian Atlantic Current by combining altimetry and hydrography // Ocean Science. 2010. Vol. 6, iss. 4. P. 901–911. <https://doi.org/10.5194/os-6-901-2010>
22. Bosse A., Fer I. Mean structure and seasonality of the Norwegian Atlantic Front Current along the Mohn Ridge from repeated glider transects // Geophysical Research Letters. 2019. Vol. 46, iss. 22. P. 13170–13179. <https://doi.org/10.1029/2019GL084723>
23. Walczowski W. Atlantic Water in the Nordic Seas. Cham : Springer, 2014. 174 p. (GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences). doi:10.1007/978-3-319-01279-7
24. Kostianoy A. G., Nihoul J. C. J., Rodionov V. B. Physical Oceanography of Frontal Zones in the Subarctic Seas. Elsevier, 2004. 316 p. (Elsevier Oceanography Series ; vol. 71).
25. Johannessen O. M. Brief overview of the physical oceanography // The Nordic seas / ed. B. G. Hurdle. New York : Springer, 1986. P. 103–128. doi:10.1007/978-1-4615-8035-5
26. Belkin I. M., Cornillon P. C. Fronts in the World Ocean's Large Marine Ecosystems. International Council for the Exploration of the Sea, 2007. 33 p. (ICES CM 2007/D:21).
27. Smart J. H. Spatial Variability of Major Frontal Systems in the North Atlantic-Norwegian Sea Area: 1980–81 // Journal of Physical Oceanography. 1984. Vol. 14, iss. 1. P. 185–192. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1984\)014<0185:SVOMFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<0185:SVOMFS>2.0.CO;2)
28. Нестеров Е. С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М. : Триада Лтд, 2013. 144 с.
29. Гулев С. К., Колинко А. В., Ланно С. С. Синоптическое взаимодействие океана и атмосферы в средних широтах. СПб. : Гидрометеиздат, 1994. 320 с.
30. Thompson D. W., Wallace J. M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // Geophysical Research Letters. 1998. Vol. 25, iss. 9. P. 1297–1300. <https://doi.org/10.1029/98GL00950>
31. Multidecadal fluctuation of the wintertime Arctic Oscillation pattern and its implication / H. Gong [et al.] // Journal of Climate. 2018. Vol. 31, iss. 14. P. 5595–5608. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0530.1>
32. Chen S., Chen W., Wu R. An interdecadal change in the relationship between boreal spring Arctic Oscillation and the East Asian summer monsoon around the Early 1970s // Journal of Climate. 2015. Vol. 28, iss. 4. P. 1527–1542. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00409.1>
33. Ambaum M. H. P., Hoskins B. J., Stephenson D. B. Arctic Oscillation or North Atlantic Oscillation? // Journal of Climate. 2001. Vol. 14, iss. 16. P. 3495–3507. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<3495:aonao>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<3495:aonao>2.0.co;2)
34. 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>
35. 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>
36. Satellite remote sensing of surface oceanic fronts in coastal waters off west-central Florida / C. C. Wall [et al.] // Remote Sensing of Environ. 2008. Vol. 112, iss. 6. P. 2963–2976. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.007>
37. Belkin I. M., O'Reilly J. E. An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery // Journal of Marine Systems. 2009. Vol. 78, iss. 3. P. 319–326. doi:10.1016/j.jmarsys.2008.11.018
38. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / В. К. Ожигин [и др.]. Мурманск : ПИПРО, 2016. 259 с.



39. 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 (34). С. 48–63. doi:10.25283/2223-4594-2019-2-48-63
40. *Roa-Pascuali L., Demarcq H., Nieblas A.-E.* Detection of mesoscale thermal fronts from 4km data using smoothing techniques: Gradient-based fronts classification and basin scale application // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 164. P. 225–237. doi:10.1016/j.rse.2015.03.030
41. *Фукс В. П.* О возможности оценки положения фронтальных зон в океане по данным спутниковых измерений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2009. № 1 (3). С. 29–34.
42. *Nilsen J. E. Ø., Nilsen F.* The Atlantic Water flow along the Vøring Plateau: Detecting frontal structures in oceanic station time series // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2007. Vol. 54, iss. 3. P. 297–319. doi:10.1016/j.dsr.2006.12.012
43. *Blindheim J., Ådlandsvik B.* Episodic formation of intermediate water along the Greenland Sea Arctic Front 1995. 11 p. (ICES CM1995/Mini:6). URL: [https://www.ices.dk/sites/pub/CM%20Documents/1995/Mini/1995\\_Mini6.pdf](https://www.ices.dk/sites/pub/CM%20Documents/1995/Mini/1995_Mini6.pdf) (date of access: 15.01.2022).
44. *Mork K. A., Blindheim J.* Variation in the Atlantic Inflow to the Nordic Seas, 1955–1996 // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2000. Vol. 47, iss. 6. P. 1035–1057. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00091-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00091-6)
45. *Piechura J., Walczowski W.* The Arctic Front: structure and dynamics // *Oceanologia*. 1995. No. 37 (1). P. 47–73.

*Об авторах:*

**Ахтямова Авелина Фидарисовна**, инженер-исследователь, кафедра океанологии, СПбГУ (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9), **ORCID ID: 0000-0001-5447-7654**, [avellinnaa@gmail.com](mailto:avellinnaa@gmail.com)

**Травкин Владимир Станиславович**, инженер-исследователь, кафедра океанологии, СПбГУ (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9), **ORCID ID: 0000-0002-7254-9313**, [v.travkin@spbu.ru](mailto:v.travkin@spbu.ru)