

УДК 551.465.62

© А. А. Коник^{1*}, О. А. Атаджанова^{1,2}, Е. В. Сентябов³, 2024

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский проспект, д. 36, Москва

²Морской гидрофизический институт РАН, 299011, ул. Капитанская, д. 2, Севастополь

³Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, 183038, ул. Академика Книповича, д. 6, Мурманск

*konikrshu@gmail.com

АНАЛИЗ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН НОРВЕЖСКОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ И ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА В МАЕ 2011–2020 ГГ.

Статья поступила в редакцию 12.12.2023, после доработки 04.03.2024, принята в печать 22.03.2024

Аннотация

Цель исследования — сравнение рассчитанных на основе спутниковых наблюдений и данных реанализа горизонтальных градиентов температуры в области поверхностных проявлений мезомасштабных фронтальных зон и для всей акватории Норвежского моря в период начала нагульных миграций пелагических рыб в мае 2011–2020 гг. На основе среднемесячных данных температуры MODIS/Aqua, GHRSSST OSTIA и CMEMS GLORYS12v1 рассчитаны поля среднемесячных и десятилетних горизонтальных градиентов на поверхности Норвежского моря. Выполнено сравнение полученных десятилетних оценок градиентов температуры с их средними климатическими значениями. Выявлено, что в большинстве данных регистрируются поверхностные проявления основных фронтальных зон Норвежского моря. На основе уникальных *in situ* наблюдений проведена валидация полей температуры в области Исландско-Фарерской фронтальной зоны. Показано, что для анализа фронтальных зон Норвежского моря наиболее предпочтительно использование полей температуры GHRSSST OSTIA. Полученные физико-географические особенности мезомасштабных фронтальных зон возможно использовать для оценки связи с миграциями пелагических рыб в Норвежском море.

Ключевые слова: градиент температуры, фронтальные зоны, валидация, Норвежское море

UDC 551.465.62

© А. А. Коник^{1*}, О. А. Атаджанова^{1,2}, Е. В. Сентябов³, 2024

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

²Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 2 Kapitanskaya Str., Sevastopol, 299011, Russia

³Polar Branch of the Russian Federal Research Institute Fisheries and Oceanography, 6 Akademika Knipovicha Str., Murmansk, 183038, Russia

*konikrshu@gmail.com

ANALYSIS OF MESOSCALE FRONTAL ZONES OF THE NORWEGIAN SEA BASED ON SATELLITE OBSERVATIONS AND REANALYSIS DATA IN MAY 2011–2020

Received 12.12.2023, Revised 04.03.2024, Accepted 22.03.2024

Abstract

The aim of this study is to compare the horizontal temperature gradients calculated based on satellite observations and reanalysis data in the area of mesoscale frontal zones' surface manifestations, both for the entire Norwegian Sea and during the onset of pelagic fish spawning migrations in May from 2011 to 2020. Using monthly average temperature data from MODIS/Aqua, GHRSSST OSTIA, and CMEMS GLORYS12v1, the fields of monthly and decade-long horizontal gradients on the surface of the Norwegian Sea were derived. A comparison was made between the decade-long temperature gradient estimates and their mean climatic values. The majority of the data show surface manifestations of the main frontal zones in the Norwegian Sea. Validation of temperature fields in the area of the Iceland-Faroe Frontal Zone was conducted based on unique *in situ* observations. It was

Ссылка для цитирования: Коник А.А., Атаджанова О.А., Сентябов Е.В. Анализ мезомасштабных фронтальных зон Норвежского моря по спутниковым наблюдениям и данным реанализа в мае 2011–2020 гг. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 1. С. 52–62. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-4

For citation: Konik A.A., Atadzhanova O.A., Sentyabov E.V. Analysis of Mesoscale Frontal Zones of the Norwegian Sea based on Satellite Observations and Reanalysis Data in May 2011–2020. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024, 17, 1, 52–62. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-4

demonstrated that for the analysis of the frontal zones in the Norwegian Sea, using the temperature fields of GHR SST OSTIA is most preferable. The obtained physico-geographical characteristics of mesoscale frontal zones could be used to assess their relationship with pelagic fish migrations in the Norwegian Sea.

Keywords: temperature gradient, frontal zones, validation, Norwegian Sea

1. Введение

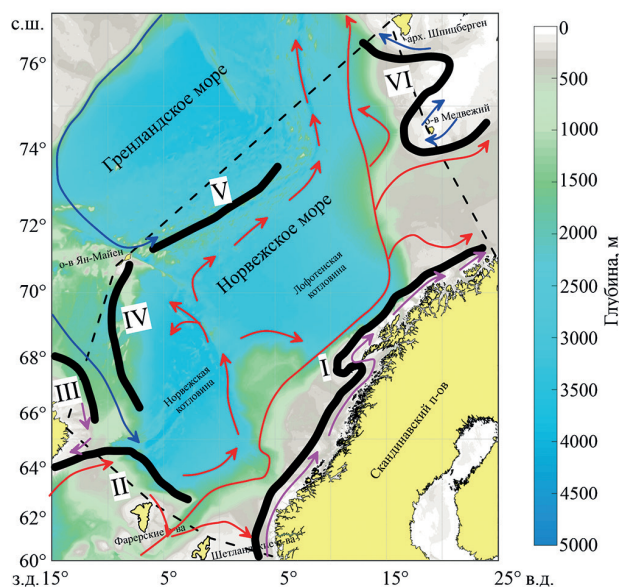
Крупномасштабные фронтальные зоны (ФЗ) в Мировом океане являются неотъемлемым элементом его динамики, при этом влияют на процессы перемешивания [1] и вихреобразования [2–4], перенос биогенных веществ [5–6] и рыбный промысел [7–8]. Однако в последние годы наблюдаются значительные климатические изменения [9–10], связанные с таянием многолетних льдов, увеличением температуры вод и усилением теплопереноса, которые находят отражение в гидрологических характеристиках морей Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана, в частности, в Норвежском море.

Норвежское море (см. рис. 1) является окраинным морем Северного Ледовитого океана и располагается между Скандинавским п-овом, Фарерскими о-вами, о-вом Исландия и архипелагом Шпицберген. Гидрологический режим моря [11–15] в большей степени определяется постоянным поступлением теплых атлантических вод с юга, которые в основном переносятся Норвежским течением и его ветвями (Восточной и Западной), а также Фарерским течением через Фареро-Исландский пролив. На границах моря происходит перемешивание данных атлантических вод с холодными водами арктического происхождения, которые на северо-западе и западе акватории переносятся Ян-Майенской ветвью Восточно-Гренландского течения и Восточно-Исландским течением соответственно, а на севере — Восточно-Шпицбергенским течением из Баренцева моря. Весомое влияние на циркуляцию Норвежского моря оказывает наличие Норвежской и Лофотенской котловин, последняя из которых характеризуется высокой энергоактивностью [16]. Данное море отличается значительными перепадами глубин и сложной системой циркуляции, которая, в том числе, зависит от интенсификации атмосферных колебаний [17].

Под воздействием перечисленных процессов в центральной части Норвежско-Гренландского бассейна формируется климатическая Северная Полярная ФЗ [11]. Данная область является зоной перемешивания атлантических и арктических вод и характеризуется большими величинами термохалинных градиентов (∇T , ∇S), которые ранее оценивались по *in situ* измерениям всей толщи вод. Из-за сложной и динамичной системы течений и изрезанной топографии Норвежского моря данная крупномасштабная ФЗ состоит из нескольких мезомасштабных ФЗ (рис. 1): ФЗ Норвежского Прибрежного течения (взаимодействие распресненных вод Норвежского Прибрежного течения и атлантических вод Восточной ветви Норвежского течения, $\nabla T = 0,25$ °C/км, $\nabla S = 0,01$ psu/км); Исландско-Фарерская ФЗ (граница атлантических вод Фарерского и Норвежского течений и субарктических вод Восточно-Исландского течения, $\nabla T = 0,4$ °C/км, $\nabla S = 0,04$ psu/км); Исландская Прибрежная ФЗ: (взаимодействие Прибрежного Исландского и Восточно-Исландского течений, $\nabla T = 0,3$ °C/км, $\nabla S = 0,02$ psu/км); Ян-Майенская ФЗ (граница вод Восточно-Исландского и Западной ветви Норвежского течений, $\nabla T = 0,1$ °C/км, $\nabla S = 0,01$ psu/км); ФЗ порога Мона (взаимодействие вод Восточно-Гренландского течения и Западной ветви Норвежского течения, $\nabla T = 0,4$ °C/км, $\nabla S = 0,01$ psu/км); ФЗ Западно-

Рис. 1. Положение основных ФЗ и течений Норвежского моря: I — ФЗ Норвежского Прибрежного течения, II — Исландско-Фарерская ФЗ, III — Исландская Прибрежная ФЗ, IV — Ян-Майенская ФЗ, V — ФЗ порога Мона; VI — ФЗ Западного Шпицбергена. Красным цветом показано движение атлантических вод, синим — арктических, а розовым — прибрежных [18]

Fig. 1. The position of the main large-scale FZ and currents of the Norwegian Sea: I — FZ of the Norwegian Coastal Current, II — Icelandic-Faroese FZ, III — Icelandic Coastal FZ, IV — Jan Mayen FZ, V — FZ of the Mona Threshold; VI — FZ of Western Svalbard. The movement of Atlantic waters is shown in red, Arctic waters in blue, and Coastal waters in pink [18]



го Шпицбергена (взаимодействие вод атлантического происхождения с шельфовыми водами архипелага Шпицберген и холодными водами Восточно-Шпицбергенского течения, $\nabla T = 0,2$ °C/км, $\nabla S = 0,02$ psu/км).

Исследование ФЗ Норвежского моря ведется уже не одно десятилетие [19–22], что связано с их влиянием на региональную и глобальную океаническую циркуляцию. Интенсификация конвективных процессов в области ФЗ сказывается на биологической продуктивности и объеме вылова пелагических видов рыб (сельдь, путассу), начало нагульных миграций которых в Норвежском море приходится на апрель–май [23–24]. Привязанность скоплений рыб на различных стадиях зрелости к высокоградиентным зонам проиллюстрирована в работах [25–26], в том числе для Норвежского моря [27]. Перечисленные факторы влияют как на экологическое, так и на экономическое состояние всего региона, что актуализирует исследование ФЗ в данном районе Северного Ледовитого океана, особенно в весенний период года.

В настоящий момент наиболее весомой проблемой в изучении ФЗ является отсутствие четкого критерия определения их физико-географических особенностей. Большинство исследователей ФЗ Мирового океана использует терминологию из фундаментального труда [28], где ФЗ определяется как область обостренных термодинамических характеристик по сравнению с их средним равномерным распределением. Основным же критерием, по которому чаще всего и определяется ФЗ в Мировом океане, является десятикратное, а для северных морей — двукратное превышение градиента гидрофизических параметров над фоновым (осредненная величина градиента по пространству и времени). Разработанные ранее теоретические представления были по большей части основаны на отрывочных данных *in situ* измерений, в то время как на настоящий момент все большее предпочтение отдается общедоступным высокоразрешающим спутниковым наблюдениям и данным моделирования (реанализ). В результате, выбор исходного типа данных из-за различия в их пространственных масштабах и обеспеченности потенциально может влиять на рассчитанную величину фонового градиента. Вместе с тем, по сравнению с типичными условиями Мирового океана, большинство ФЗ Норвежского моря располагаются на глубоководных горизонтах, что осложняет процесс их идентификации на поверхности. В контексте указанных проблем сравнение величины фонового температурного поверхностного градиента Норвежского моря по разнородным данным как основного инструмента для определения ФЗ на поверхности остается актуальной и важной задачей.

Таким образом, цель данного исследования — сравнение рассчитанных на основе спутниковых наблюдений и данных реанализа горизонтальных градиентов температуры в области поверхностных проявлений мезомасштабных фронтальных зон и для всей акватории Норвежского моря в период начала нагульных миграций пелагических рыб в мае 2011–2020 гг.

2. Данные и методы

В качестве исходных данных для расчета градиентов использовались различные информационные продукты, содержащие данные температуры поверхности Норвежского моря с пространственным шагом по широте и долготе от 4 до 25 км за май 2011–2020 гг.

Спутниковые измерения температуры поверхности моря (ТПМ) были представлены суточными и годовыми среднемесячными данными радиометра видимого и ИК-диапазонов MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua с пространственным разрешением $0,05^\circ$ [29].

Продукт GHR SST OSTIA (The Group for High Resolution Sea Surface Temperature Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) содержит в себе осредненные с помощью оптимальной интерполяции поля данных на глобальной сетке $0,054^\circ$ по широте и долготе [30]. GHR SST OSTIA основывается на спутниковых данных температуры поверхности океана с датчиков высокого разрешения (AVHRR, AMSR-E, AATSR) и данных, полученных с буев. Для расчетов использовались суточные данные GHR SST OSTIA, которые предварительно усреднялись до месячного интервала.

Продукт GLOBAL OCEAN PHYSICS REANALYSIS (сокращённо CMEMS GLORYS12v1, <https://doi.org/10.48670/moi-00021>) содержит в себе среднемесячные и суточные гидрофизические поля с глобальным охватом в разрешении $0,083^\circ$ по долготе и широте для 50-ти горизонтов. Модельная составляющая данного реанализа — глобальная океаническая модель NEMO. Наблюдения данных температуры, солёности, течений, уровня моря и поверхности льда усваиваются с помощью фильтра Калмана. Для оценки градиентов использовались среднемесячные значения ТПМ.

Качество используемых данных зависит как от вида зондирующих систем, так и от состояния поверхностных вод исследуемой акватории. Погрешность используемых в работе спутниковых данных (MODIS/Aqua) температуры поверхности моря не превышает $0,15$ °C, в то время как для данных реанализа

(GHRSSST OSTIA, CMEMS GLORYS12v1) — 0,1 °C. Кроме того, необходимо учитывать сложные метеорологические условия (частый облачный покров), которые весомо могут влиять на обеспеченность спутниковыми данными района исследования. Так, дистанционные измерения наиболее обеспечены (более 250 суточных значений температуры спутника MODIS/Aqua за май десяти лет на единицу сетки с шагом 1 км) вблизи береговой зоны Скандинавского п-ова и о-ва Исландия. Центральные районы Норвежского моря менее обеспечены (150 значений), а меньше всего данных (менее 50-ти значений) наблюдается в северных районах моря.

Поля поверхностных градиентов, осредненных за все майские месяцы 2011–2020 гг. рассчитывались для всех типов данных одинаково. Первый этап включал в себя осреднение среднемесячных полей температуры за десятилетие (декаду). Второй этап заключался в расчёте горизонтальных градиентов температуры (∇T) согласно методу, неоднократно апробированному для Баренцева моря [31]. На третьем этапе определялся модуль $|\nabla T|$, который далее в работе будет обозначаться ∇T . Вначале производился расчет шага по параллели и меридиану в километрах, далее выполнялся расчет зональной и меридиональной составляющих градиента для каждого узла сетки. Итоговый декадный модуль горизонтального градиента по всему морю рассчитывался как квадратный корень суммы квадратов зональной и меридиональной составляющих. Фоновый градиент рассчитывался как среднее значение ∇T в каждой ячейке поля и осреднялся по пространству для всего Норвежского моря. Далее на основе исследований [11, 17, 22] определялись географические границы ФЗ Норвежского моря и средняя величина их ∇T внутри выделенных областей ФЗ. В качестве основного критерия определения ФЗ выступало превышение величины климатического градиента Норвежского моря, равной 0,01 °C/км [11], минимум в два раза.

Дополнительно для оценки качества исходных полей температуры проводилась их валидация с помощью *in situ* измерений на глубине 10 м за 2–16 мая 2011 г. из базы данных международных съемок пелагических рыб (International Pelagic Surveys (IPS)) [24], данные которой доступны авторам статьи как непосредственным участникам экспедиций. В базе содержатся первичные океанографические и биологические данные, собранные с судов во время проведения международных экосистемных съемок в северных морях, включая Норвежское море, за более чем десятилетний период. Методика проведения ежегодных международных съемок Норвежского моря представлена в работе [24], в качестве основного измерительного прибора использовался СТД-зонд SBE-911. Выбор в качестве верхнего горизонта 10 м в *in situ* измерениях связано как с термической структурой верхнего квазиоднородного слоя в этот период, так и с особенностями натурных измерений на различных судах (разные участники международных съемок принимали за корректный верхний горизонт измерений глубину погружения прибора от 3 до 7 м). Предварительные расчеты разницы измеренной температуры между верхним горизонтом и 10 м для каждой станции показали, что в среднем она составляет 0,03 °C.

Район для проведения валидации, Исландско-Фарерская фронтальная зона (ИФФЗ), был выбран исходя из его наибольшей обеспеченности *in situ* измерениями в указанный период. На основе суточных данных (MODIS/Aqua, GHRSSST OSTIA и GLORYS12v1) создавались массивы композитных данных для каждого информационного продукта. Подбор данных к станциям *in situ* производился для каждого дня измерений на основе расчета наименьших расстояний от координат станций до координат точек значений реанализа/спутниковых данных. В результате были подготовлены ряды для валидации данных MODIS/Aqua, GHRSSST OSTIA и GLORYS12v1, каждый из которых имел длину 50 значений температуры, которые соответствовали станциям, попавшим в зону ИФФЗ. Валидация выполнялась на основе метода, представленного в работе [32], который состоял в количественной оценке соответствия рядов друг другу, в том числе с помощью расчета средних аномалии An (1) и функции расхождения (стоимости) F (2):

$$An = \frac{\sum_{j=1}^N |I_j - X_j|}{N}, \quad (1)$$

$$F = \left| \frac{Mi - Mx}{\sqrt{D}} \right|, \quad (2)$$

где N — длина ряда, I — значения ТПМ по *in situ* наблюдениям, Mi и D — среднее значение и дисперсия ТПМ по *in situ* наблюдениям, X — значения ТПМ по данным реанализа/спутниковых данных, Mx — среднее значение ТПМ по данным реанализа/спутниковых, j — порядковый номер узла.

3. Результаты исследования

3.1. Характеристики температуры поверхности Норвежского моря

На основе многолетних данных температуры поверхности моря был произведен расчет среднемесячных и декадных горизонтальных градиентов температуры Норвежского моря, пространственная изменчивость которых представлена на рис. 2.

По многолетним данным спутника MODIS/Aqua (рис. 2, а), максимальные значения температуры ($>10^{\circ}\text{C}$) в мае отмечаются на юге Норвежского моря вблизи Шетландских и Фарерских о-вов в зоне интенсивной адвекции тепла с Атлантического океана Северо-Атлантическим течением [33]. На западной границе моря в мае в области перемешивания атлантических вод с водами Восточно-Гренландского и Восточно-Исландского течений и на северо-востоке с водами Восточно-Шпицбергенского и Медвежинского течений регистрируется минимум ТПМ, варьирующийся в диапазоне $1\text{--}3^{\circ}\text{C}$. В центральной части моря располагаются трансформированные атлантические воды, поверхностная температура которых составляет $5\text{--}8^{\circ}\text{C}$. Средняя декадная величина ТПМ на всей акватории моря в мае — $5,9^{\circ}\text{C}$. На картах ∇T Норвежского моря за декаду (рис. 2, б) четко прослеживаются области мезомасштабных ФЗ. Так, на севере вблизи архипелага Шпицберген регистрируется область ФЗ Западного Шпицбергена, декадный ∇T которой составляет более $0,05^{\circ}\text{C}/\text{км}$, что соотносится с оценками в проведенных ранее исследованиях [31, 34]. Вдоль Скандинавского п-ова на востоке моря, преимущественно вдоль Лофотенских о-вов, детектируется ФЗ Норвежского прибрежного течения. Декадная величина ∇T данной ФЗ не превышает $0,04^{\circ}\text{C}/\text{км}$, что ниже на $0,01^{\circ}\text{C}/\text{км}$ по сравнению с результатами [11]. Полученные в работах [22, 36] количественные оценки ярко-выраженной области Исландско-Фарерской ФЗ в южной части Норвежского моря севернее Фарерских о-вов схожи с величиной полученного декадного ∇T по спутниковым

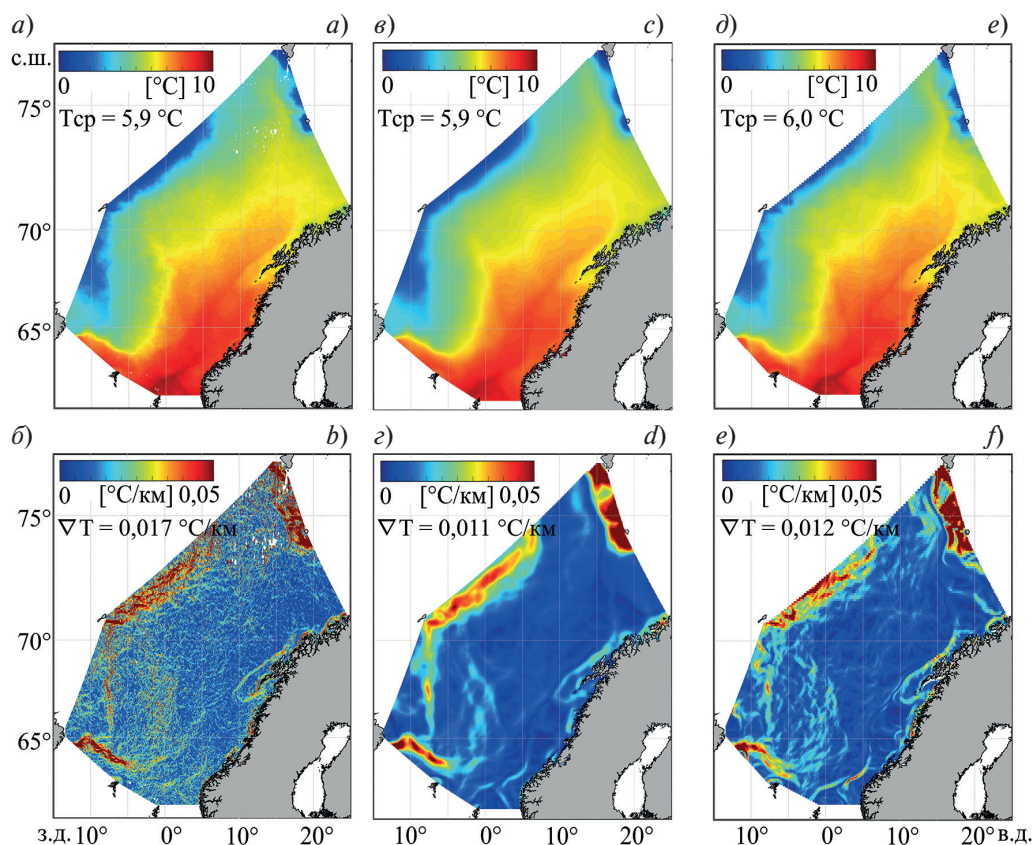


Рис. 2. Декадная величина поверхностной температуры и её градиента для Норвежского моря по данным MODIS/Aqua (а–б), GHRSSST OSTIA (в–д) и CMEMS GLORYS12v1 (д–е) за май 2011–2020 гг.

Fig. 2. Decadal value of surface temperature and its gradient for the Norwegian Sea according to MODIS/Aqua (a–b), GHRSSST OSTIA (c–d) and CMEMS GLORYS12v1 (d–e) for May 2011–2020

данным, который составляет $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$. В западной части Норвежского моря от о-ва Исландия до о-ва Ян-Майен регистрируется область Ян-Майенской ФЗ ($\nabla T = 0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$), градиенты которой меньше на $0,02\text{--}0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ в сравнении с оценками из исследования [17, 35]. Севернее отмечается высокоградиентная ФЗ порога Мона ($\nabla T = 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$). Декадная величина фонового ∇T всего Норвежского моря по спутниковым данным температуры составляет $0,017\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

Распределение ТПМ Норвежского моря в мае продукта GHRSSST OSTIA (рис. 2, в) хорошо соотносится с полями температуры по спутниковым данным. Максимум температуры составляет $9\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и наблюдаются на юге Норвежского моря, а минимальные ($3\text{--}4\text{ }^{\circ}\text{C}$) регистрируются на границе с Гренландским и Баренцевым морями. Однако в центральной части замечен сглаженный переход от более низких ($4\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$) к более высоким ($6\text{--}8\text{ }^{\circ}\text{C}$) значениям ТПМ, что связано с влиянием интерполяции при ассимиляции исходных данных в продукт GHRSSST OSTIA. Декадная величина поверхностной температуры Норвежского моря составляет $5,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Анализ карты ∇T (рис. 2, г) показал, что большинство ФЗ Норвежского моря также регистрируется, а величина ∇T GHRSSST OSTIA по сравнению с ∇T MODIS/Aqua занижена: на севере ФЗ Западного Шпицбергена ($\nabla T = 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$), на востоке ФЗ Норвежского прибрежного течения ($\nabla T = 0,02\text{--}0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$), на юге область Исландско-Фарерской ФЗ ($\nabla T = 0,04\text{--}0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$), а на западе Ян-Майенская ФЗ ($\nabla T = 0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$) и ФЗ порога Мона ($\nabla T > 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$). При сравнении полученных оценок с величиной градиента температуры из работ [11, 22, 35–36] разница в величине ∇T последних ФЗ может достигать $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, при этом для ФЗ Западного Шпицбергена и ФЗ Норвежского прибрежного течения полученные оценки градиентов схожи. Декадная величина ∇T Норвежского моря по данным продукта GHRSSST OSTIA составляет $0,011\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

Данные ТПМ Норвежского моря продукта CMEMS GLORYS12v1 представлены на рис. 2, д. Температура в области перемешивания теплых и холодных вод на севере и западе моря составляет порядка $2\text{--}4\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом на границе с Гренландским морем ТПМ в среднем на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше по сравнению с данными дистанционного зондирования. В центральной части температура варьирует от 7 до $9\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на юге составляет $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Средняя декадная величина поверхностной температуры Норвежского моря незначительно выше по сравнению с другими типами данных — $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Основные максимумы на декадной карте ∇T (рис. 2, е) приурочены к ФЗ Западного Шпицбергена ($\nabla T = 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$). Минимум регистрируется в ФЗ Норвежского прибрежного течения ($\nabla T < 0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$). Величина ∇T Исландско-Фарерской и ФЗ порога Мона составляет $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, а Ян-Майенской ФЗ — не более $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Все полученные оценки ∇T внутри выделенных ФЗ были близки к величинам из исследования [22], которое также базировалось на анализе данных CMEMS GLORYS12v1. Декадная величина ∇T Норвежского моря по данным океанского реанализа за CMEMS GLORYS12v1 составила $0,012\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

Область Исландской Прибрежной ФЗ по данным ∇T ни в одном из типов данных на поверхности не регистрируется.

Важно отметить, что интенсификация отдельных ФЗ за счет конвергенции взаимодействующих на их границах течений может влиять на рост кормовой базы, и, впоследствии, на перемещение пелагических рыб в Норвежском море [25–27].

В таблице 1 представлены среднемесячные и декадные оценки фоновых поверхностных градиентов температуры для Норвежского моря за май 2011–2020 гг.

По спутниковым данным максимальная величина фонового ∇T регистрируется в 2013 г. ($0,051\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$), а минимальная — в 2017 г. ($0,034\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$). В данных GHRSSST OSTIA в поле температуры однозначно отмечается минимум только в 2016 г. ($0,010\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$). По данным CMEMS GLORYS12v1 максимальная величина фонового ∇T наблюдается в 2012 г. Декадная величина ∇T по данным MODIS/Aqua составила $0,017\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$,

Таблица 1

Table 1

**Изменчивость фоновых поверхностных горизонтальных градиентов температуры
в Норвежском море за май 2011–2020 гг.**

Variability of background surface horizontal temperature gradients in the Norwegian Sea for May 2011–2020

Продукт/Год	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2011–2020
MODIS/Aqua, $^{\circ}\text{C}/\text{км}$	0,035	0,038	0,051	0,036	0,040	0,036	0,034	0,029	0,049	0,038	0,017
GHRSSST OSTIA, $^{\circ}\text{C}/\text{км}$	0,012	0,012	0,012	0,011	0,012	0,010	0,011	0,011	0,012	0,012	0,011
GLORYS12v1, $^{\circ}\text{C}/\text{км}$	0,016	0,017	0,016	0,015	0,016	0,014	0,014	0,014	0,014	0,016	0,012

GHRSSST OSTIA — 0,011 °C/км, CMEMS GLORYS12v1—0,012 °C/км. Поверхностные оценки ∇T продукта GHRSSST OSTIA и продукта CMEMS GLORYS12v1 наиболее близки к их климатическим величинам для Норвежского моря (0,01 °C/км), которые ранее были рассчитаны на основе архива *in situ* измерений [11]. При этом декадная величина ∇T по данным дистанционного зондирования почти в 1,5 раза выше значений по реанализу, что может быть связано с плохой обеспеченностью и качеством спутниковых измерений, которое сказалось на итоговых величинах как среднемесячных, так и декадных оценок.

Таким образом, среднемесячная и декадная величина горизонтальных градиентов температуры весомо зависит от выбранного типа данных. Сравнение ∇T основных ФЗ Норвежского моря показало, что их декадная величина по спутниковым измерениям MODIS/Aqua в среднем выше на 0,05 °C/км, чем по данным GHRSSST OSTIA и CMEMS GLORYS12v1. Для выбора информационного продукта, наиболее достоверно описывающего полученные декадные оценки ∇T Норвежского моря, требуется проведение валидации их полей температуры по данным *in situ* измерений в одной из ФЗ.

3.2. Валидация данных температуры поверхности в районе Исландско-Фарерской фронтальной зоны

В качестве области для валидации данных был выбран район ИФФЗ. Предварительный анализ суточных полей температуры на поверхности различных информационных продуктов выявил невозможность использования MODIS/Aqua для создания композитных данных ввиду их недостаточной обеспеченности суточными данными из-за облачного покрова в период *in situ* измерений в районе ИФФЗ. Поэтому для валидации использовались данные только GHRSSST OSTIA и GLORYS12v1, результаты которой представлены в таблице 2.

Статистические характеристики ($\bar{T}$, D) между данными разных продуктов близки, что подтверждается оценками для пар (*in situ* — GLORYS12v1; *in situ* — GHRSSST OSTIA) статистического равенства средних значений (по критерию Стьюдента) и дисперсий (по критерию Фишера) при уровне значимости 5%. Полученные значения критериев меньше их критических значений, что говорит о незначимых различиях. Данные температуры продуктов CMEMS GLORYS12v1 и GHRSSST OSTIA показали высокую корреляцию с данными *in situ* ($R > 0,9$). Также наблюдалась небольшая An , а $F_{расх}$ была близка к нулю, что позволяет сделать вывод о высокой точности воспроизведения температуры верхнего слоя в области ИФФЗ Норвежского моря в мае 2011 г.

Результаты регрессионного анализа различных информационных продуктов представлены на рис. 3. Эллипс рассеяния облака точек максимально вырожден в прямую линию между данными температуры *in situ* и GHRSSST OSTIA (рис. 3, а) в сравнении с другими графиками, что также подтверждается самым высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,94$). Небольшое рассеяние точек *in situ* в диапазоне 4–8 °C от тренда отмечается у значений температуры *in situ*/CMEMS GLORYS12v1 (рис. 3, б), но при этом при более низких и высоких температурах точки близки к прямой при общем $R^2 = 0,88$.

Выполненная валидация показала хорошее воспроизведение полей температуры поверхности у продуктов GHRSSST OSTIA и CMEMS GLORYS12v1 в высокоградиентной области ИФФЗ, что позволяет в дальнейшем их использовать при расчетах и анализе фоновых среднемесячных и декадных градиентов Норвежского моря для оценки ФЗ. Недостаточная обеспеченность спутниковых данных на суточных интервалах не позволяет проводить оценку градиентов температуры и требует разработки новых методов при их использовании в качестве инструмента для анализа ФЗ.

Таблица 2

Table 2

Статистические параметры для сравнительного анализа экспедиционных (*in situ*) и композитных (GHRSSST OSTIA, GLORYS12v1) данных

Statistical parameters for comparative analysis of expedition (*in situ*) and composite (GHRSSST OSTIA, GLORYS12v1) data

Реанализ/параметр	$\bar{T}$, °C	D , °C ²	An , °C	F	R
GLORYS12v1	6,45	4,12	0,64	0,06	0,94
GHRSSST OSTIA	6,33	3,81	0,46	0,01	0,97

Примечание: $\bar{T}$ — среднее значение температуры (*in situ* = 6,3 °C); D — дисперсия (*in situ* = 5,04 °C²); An — аномалия; F — функция расхождения; R — коэффициент корреляции

Note: $\bar{T}$ — average temperature (*in situ* = 6.3 °C); D — dispersion (*in situ* = 5.04 °C²); An — anomaly; F — divergence function; R — the correlation coefficient

4. Заключение

В рамках исследования был проведен сравнительный анализ количественных оценок градиентов температуры в области поверхностных проявлений мезомасштабных фронтальных зон и для всей акватории Норвежского моря на основе спутниковых наблюдений и данных реанализа в период начала нагульных миграций пелагических рыб в мае 2011–2020 гг.

Сравнение поверхностных градиентов температуры различных ФЗ показало, что максимумы наблюдаются в областях ФЗ Западного Шпицбергена ($\nabla T > 0,05$ °C/км) и ФЗ порога Мона ($\nabla T = 0,05$ °C/км), а минимумы — в Ян-Майенской ФЗ ($\nabla T = 0,03$ °C/км) и ФЗ Норвежского Прибрежного течения ($\nabla T < 0,03$ °C/км). Полученные результаты количественных оценок и положений выделенных ФЗ схожи с большинством исследований [11, 16, 21, 34–35], заметно уменьшение градиента Ян-Майенская ФЗ на 0,02 °C/км. Отмечено отсутствие градиентов в поле температуры Исландской Прибрежной ФЗ.

К климатическим оценкам фоновых температурных градиентов Норвежского моря из работы [11] наиболее близки полученные декадные величины по данным GHR SST OSTIA — 0,011 °C/км. Обеспеченность спутниковых измерений по акватории значительно повлияла как на межгодовую, так и на декадную величину фонового поверхностного градиента температуры, который почти 1,5 раза ($\nabla T = 0,17$ °C/км) превышал среднеклиматический показатель, а в отдельные годы в 3–4 раза. Проведенная валидация информационных продуктов на основе уникальных *in situ* измерений подтвердила хорошее воспроизведение поверхностных полей температуры GHR SST OSTIA и CMEMS GLORYS12v1 в области высокоградиентной ИФФЗ.

Таким образом, новизна работы состоит в том, что показано, что величина среднемесячного и декадного горизонтального градиента температуры за май весомо зависит от выбранного типа данных. На основании сравнительного и статистического анализов данных поверхностной температуры можно утверждать, что для получения и описания физико-географических характеристик ФЗ на поверхности Норвежского моря рекомендуется использовать данные GHR SST OSTIA. Мезомасштабные ФЗ, область максимальных градиентов которых находится на значительных глубинах, возможно анализировать на основе их поверхностных проявлений, а полученные их физико-географические особенности использовать для оценки связи с миграциями пелагических рыб.

Финансирование

Обработка спутниковых и данных реанализа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН FMWE-2024–0028. Обработка и анализ *in situ* измерений выполнены в рамках государственного задания ФГБНУ «ВНИРО» по теме 5.4.7 «Оценка состояния, распределения, численности и воспроизводства водных биологических ресурсов, а также среды их обитания».

Funding

Processing of satellite and reanalysis data was performed within the framework of the state assignment of the IO RAS FMWE-2024–0028. Processing and analysis of *in situ* measurements were performed within the framework of the state assignment of FGBNU “VNIRO” under the theme 5.4.7 “Assessment of the state, distribution, abundance and reproduction of aquatic biological resources, as well as their habitat”.

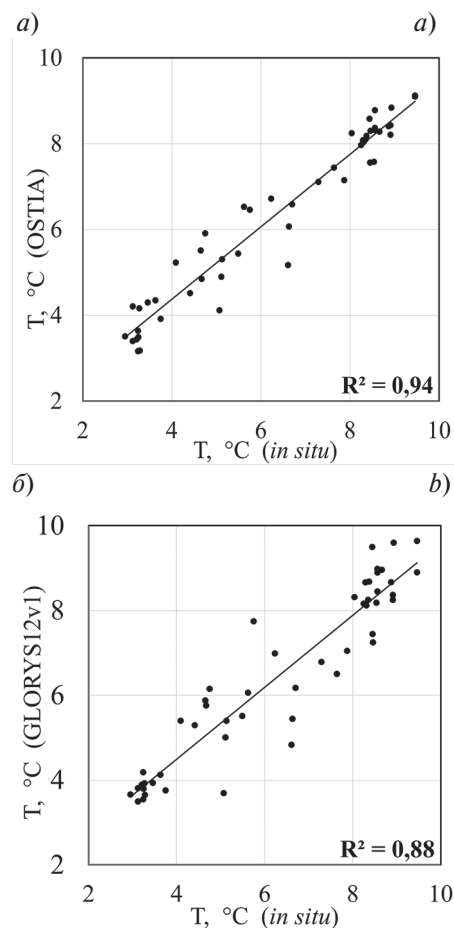


Рис. 3. Результаты расчёта линейной регрессии между *in situ* измерениями и композитными данными: а — *in situ*/GHR SST OSTIA; б — *in situ*/CMEMS GLORYS12v1. R^2 — коэффициент детерминации

Fig. 3. The results of calculating the linear regression between *in situ* measurements and composite data: а — *in situ*/GHR SST OSTIA; б — *in situ*/CMEMS GLORYS12v1. R^2 is the coefficient of determination

Литература

1. Li Q.P., Franks P.J.S., Ohman M.D., Landry M.R. Enhanced nitrate fluxes and biological processes at a frontal zone in the southern California current system // *Journal of Plankton Research*. 2012. Vol. 34, N 9. P. 790–801. doi:10.1093/plankt/fbs006
2. Sampe T., Nakamura H., Goto A., Ohfuchi W. Significance of a Midlatitude SST Frontal Zone in the Formation of a Storm Track and an Eddy-Driven Westerly Jet // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23, N 7. P. 1793–1814. doi:10.1175/2009JCLI3163.1
3. Gordeeva S., Zinchenko V., Koldunov A., Raj R.P., Belonenko T. Statistical analysis of long-lived mesoscale eddies in the Lofoten basin from satellite altimetry // *Advances in Space Research*. 2020. S0273117720303768. doi:10.1016/j.asr.2020.05.043
4. Yuan J., Liang J.-H. Wind- and Wave-Driven Ocean Surface Boundary Layer in a Frontal Zone: Roles of Submesoscale Eddies and Ekman–Stokes Transport // *Journal of Physical Oceanography*. 2021. Vol. 51, N 8. P. 2655–2680. doi:10.1175/JPO-D-20-0270.1
5. Hansen C., Kvaleberg E., Samuelsen A. Anticyclonic eddies in the Norwegian Sea; their generation, evolution and impact on primary production // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2010. Vol. 57, N 9. P. 1079–1091. doi:10.1016/j.dsr.2010.05.013
6. Cassar N., DiFiore P.J., Barnett B.A., Bender M.L., Bowie A.R., Tilbrook B., Petrou K., Westwood K.J., Wright S.W., Lefevre D. The influence of iron and light on net community production in the Subantarctic and Polar Frontal Zones // *Bio-geosciences*. 2011. Vol. 8, N 2. P. 227–237. doi:10.5194/bg-8-227-2011
7. Eliassen S.K., Homrum E.I., Jacobsen J.A., Kristiansen I., Óskarsson G.J., Salthaug A., Stenevik E.K. Spatial Distribution of Different Age Groups of Herring in Norwegian Sea, May 1996–2020 // *Frontiers in Marine Sciences*. 2021. Vol. 8. P. 778725. doi:10.3389/fmars.2021.778725
8. Stiansen J.E., Johansen G.O., Sandø A.B., Loeng H. Northern Seas: Climate and Biology. Marine Resources. Climate Change and International Management Regimes, 2022. 99 p.
9. Overland J.E., Wang M., Walsh J.E., Stroeve J.C. Future Arctic climate changes: Adaptation and mitigation time scales // *Earth's Future*. 2013. Vol. 2. P. 68–74. doi:10.1002/2013ef000162
10. Yamanouchi T., Takata K. Rapid change of the Arctic Climate system and its global influences — Overview of GRENE Arctic Climate change research project (2011–2016) // *Polar Science*. 2020. Vol. 25. 100548. doi:10.1016/j.polar.2020.100548
11. Родионов В.Б., Костяной А.Г. Океанические фронты морей Северо–европейского бассейна. М.: ГЕОС, 1998. 292 с.
12. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. Л.: Гл. упр. навигации и океанографии, 1980. 185 с.
13. Beldring S., Engen-Skaugen T., Førland E.J., Roald L.A. Climate change impacts on hydrological processes in Norway based on two methods for transferring regional climate model results to meteorological station sites // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2008. Vol. 60, N 3. P. 439–450. doi:10.1111/j.1600-0870.2007.00306.x
14. 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, N 22. P. 170–179. doi:10.1029/2019GL084723
15. Kjell A.O., Nilner P. Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and Nordic Seas toward Arctic // *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 29, N 19. 1896. doi:10.1029/2002gl015002
16. Фёдоров А.М., Башмачников 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. doi:10.21638/spbu07.2019.308
17. Raj R.P., Chatterjee S., Bertino L., Turiel A., Portabella M. The Arctic Front and its variability in the Norwegian Sea // *Ocean Science*. 2019. Vol. 15, N 6. P. 1729–1744. doi:10.5194/os-15-1729-2019
18. González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A. ICES Report on ocean climate 2020 // *ICES Cooperative Research Reports*. 2022. Vol. 356. 121 p. doi:10.17895/ices.pub.19248602
19. 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, N 1. P. 185–192. doi:10.1175/1520-0485(1984)014<0185:svomfs>2.0.co;2
20. Blindheim J. Arctic intermediate water in the Norwegian sea // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1990. Vol. 37, N 9. P. 1475–1489. doi:10.1016/0198-0149(90)90138-1
21. Nilsen J.E.Ø., Falck E. Variations of mixed layer properties in the Norwegian Sea for the period 1948–1999 // *Progress in Oceanography*. 2006. Vol. 70, N 1. P. 58–90. doi:10.1016/j.pocean.2006.03.014
22. Ахтямова А.Ф., Травкин В.С. Исследование фронтальных зон Норвежского моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 1. С. 67–83. doi:10.29039/0233-7584-2023-1-67-83
23. Bergstad O.A., Bjelland O., Gordon J.D.M. Fish communities on the slope of the eastern Norwegian Sea // *Sarsia*. 1999. Vol. 84, N 1. P. 67–78. doi:10.1080/00364827.1999.10420452
24. ICES. Manual for International Pelagic Surveys (IPS). Series of ICES Survey Protocols SISP 9 — IPS, 2015. 92 p. doi:10.17895/ices.pub/7582
25. Olson D.B., Hitchcock G.L., Mariano A.J., Ashjian C.J., Peng G., Nero R.W., Podest G.P. Life on the edge: Marine life and fronts // *Oceanography*. 1994. Vol. 7, N 2. P. 52–60. doi:10.5670/oceanol.1994.03
26. Bakun A. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage // *Scientia Marina*. 2006. N 70S2. P. 105–122.

27. Сентябов Е.В. Опыт использования температурно-акустических разрезов в международных экосистемных съемках для анализа распределения пелагических рыб Норвежского моря // Труды ВНИРО. 2018. Т. 174. С. 105–111. doi:10.36038/2307-3497-2018-174-105-111
28. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
29. Liu Y., Minnett P.J. Sampling errors in satellite-derived infrared sea-surface temperatures. Part I: Global and regional MODIS fields // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 177. P. 48–64. doi:10.1016/j.rse.2016.02.026
30. Stark J.D., Donlon C.J., Martin M.J., McCulloch M.E. OSTIA: An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system // Oceans. 2007. 061214–029. doi:10.1109/oceanse.2007.4302251
31. Ivshin V.A., Trofimov A.G., Titov O.V. Barents Sea thermal frontal zones in 1960–2017: variability, weakening, shifting // ICES Journal of Marine Science. 2019. Vol. 76. P. i3–i9. doi:10.1093/icesjms/fsz159
32. Зимин А.В., Атаджанова О.А., Коник А.А., Гордеева С.М. Сравнение результатов наблюдений, выполненных в Баренцевом море, с данными из глобальных океанологических баз // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 4. С. 66–77. doi:10.7868/S2073667320040061
33. Ashbjørnsen H., Årthun M., Skagseth Ø., Eldevik T. Mechanisms of ocean heat anomalies in the Norwegian Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124. P. 2908–2923. doi:10.1029/2018JC014649
34. Ozil L., Sirven J., Gascard J.C. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011) // Ocean Science. 2016. Vol. 12, N 1. P. 169–184. doi:10.5194/os-12-169-2016
35. Кораблёв А.А. Система фронтальных разделов Норвежской ЭАЗО // Исследование роли энергоактивных зон океана в короткопериодных колебаниях климата. М.: ВИНТИ, 1987. С. 380–386.
36. Belkin I.M. Remote sensing of ocean fronts in marine ecology and fisheries // Remote Sensing. 2021. Vol. 13, N 5. 883. doi:10.3390/rs13050883

References

1. Li Q.P., Franks P.J.S., Ohman M.D., Landry M.R. Enhanced nitrate fluxes and biological processes at a frontal zone in the southern California current system. *Journal of Plankton Research*. 2012, 34, 9, 790–801. doi:10.1093/plankt/fbs006
2. Sampe T., Nakamura H., Goto A., Ohfuchi W. Significance of a Midlatitude SST Frontal Zone in the Formation of a Storm Track and an Eddy-Driven Westerly Jet. *Journal of Climate*. 2010, 23, 7, 1793–1814. doi:10.1175/2009JCLI13163.1
3. Gordeeva S., Zinchenko V., Koldunov A., Raj R.P., Belonenko T. Statistical analysis of long-lived mesoscale eddies in the Lofoten basin from satellite altimetry. *Advances in Space Research*. 2020. S0273117720303768. doi:10.1016/j.asr.2020.05.043
4. Yuan J., Liang J.-H. Wind- and wave-driven ocean surface boundary layer in a frontal zone: Roles of submesoscale eddies and Ekman–Stokes transport. *Journal of Physical Oceanography*. 2021, 51, 8, 2655–2680. doi:10.1175/JPO-D-20-0270.1
5. Hansen C., Kvaleberg E., Samuelsen A. Anticyclonic eddies in the Norwegian Sea; their generation, evolution and impact on primary production. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2010, 57, 9, 1079–1091. doi:10.1016/j.dsr.2010.05.013
6. Cassar N., DiFiore P.J., Barnett B.A., Bender M.L., Bowie A.R., Tilbrook B., Petrou K., Westwood K.J., Wright S.W., Lefevre D. The influence of iron and light on net community production in the Subantarctic and Polar Frontal Zones. *Biogeosciences*. 2011, 8, 2, 227–237. doi:10.5194/bg-8-227-2011
7. Eliassen S.K., Homrum E.I., Jacobsen J.A., Kristiansen I., Óskarsson G.J., Salthaug A., Stenevik E.K. Spatial distribution of different age groups of herring in Norwegian Sea, May 1996–2020. *Frontiers in Marine Sciences*. 2021, 8, 778725. doi:10.3389/fmars.2021.778725
8. Stiansen J.E., Johansen G.O., Sandø A.B., Loeng H. Northern Seas: Climate and Biology. Marine Resources. Climate Change and International Management Regimes, 2022. 99 p.
9. Overland J.E., Wang M., Walsh J.E., Stroeve J.C. Future Arctic climate changes: Adaptation and mitigation time scales. *Earth's Future*. 2013, 2, 68–74. doi:10.1002/2013ef000162
10. Yamanouchi T., Takata K. Rapid change of the Arctic Climate system and its global influences — Overview of GRENE Arctic Climate change research project (2011–2016). *Polar Science*. 2020, 25, 100548. doi:10.1016/j.polar.2020.100548
11. Rodionov V.B., Kostjanoj A.G. Oceanic fronts of the seas of the North European basin. М.: GEOS, 1998. 292 p. (in Russian).
12. Atlas of the oceans. Arctic Ocean. Leningrad: Gl. upr. navigacii i okeanografii. 1980. 185 p. (in Russian).
13. Beldring S., Engen-Skaugen T., Førland E.J., Roald L.A. Climate change impacts on hydrological processes in Norway based on two methods for transferring regional climate model results to meteorological station sites. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2008, 60, 3, 439–450. doi:10.1111/j.1600-0870.2007.00306.x
14. 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, 46, 22, 170–179. doi:10.1029/2019GL084723
15. Kjell A.O., Niiler P. Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and Nordic Seas toward Arctic. *Geophysical Research Letters*. 2002, 29, 19, 1896. doi:10.1029/2002gl015002

16. Fedorov A.M., Bashmachnikov I.L., Belonenko T.V. Winter Convection in the Lofoten Basin according to ARGO Buoys and Hydrodynamic Modeling. *Vestnik of St-Petersburg University. Earth Sciences*. 2019, 64, 3, 491–511. doi:10.21638/spbu07.2019.308 (in Russian).
17. Raj R.P., Chatterjee S., Bertino L., Turiel A., Portabella M. The Arctic Front and its variability in the Norwegian Sea. *Ocean Science*. 2019, 15, 6, 1729–1744. doi:10.5194/os-15-1729-2019
18. González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A. ICES Report on ocean climate 2020. *ICES Co-operative Research Reports*. 2022, 356, 121 p. doi:10.17895/ices.pub.19248602
19. Smart J.H. Spatial variability of major frontal systems in the North Atlantic-Norwegian Sea Area: 1980–81. *Journal of Physical Oceanography*. 1984, 14, 1, 185–192. doi:10.1175/1520-0485(1984)014<0185:svomfs>2.0.co;2 Jjbkn
20. Blindheim J. Arctic intermediate water in the Norwegian sea. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1990, 37, 9, 1475–1489. doi:10.1016/0198-0149(90)90138-1
21. Nilsen J.E.Ø., Falck E. Variations of mixed layer properties in the Norwegian Sea for the period 1948–1999. *Progress in Oceanography*. 2006, 70, 1, 58–90. doi:10.1016/j.pocean.2006.03.014
22. Akhtyamova A.F., Travkin V.S. Investigation of frontal zones in the Norwegian Sea. *Physical Oceanography*, 2023, 30, 1, 62–77. doi:10.29039/1573-160X-2023-1-62-77
23. Bergstad O.A., Bjelland O., Gordon J.D.M. Fish communities on the slope of the eastern Norwegian Sea. *Sarsia*. 1999, 84, 1, 67–78. doi:10.1080/00364827.1999.10420452
24. ICES. Manual for International Pelagic Surveys (IPS). *Series of ICES Survey Protocols SISP 9 — IPS*. 2015. 92 p. doi:10.17895/ices.pub/7582
25. Olson D.B., Hitchcock G.L., Mariano A.J., Ashjian C.J., Peng G., Nero R.W., Podest G.P. Life on the edge: Marine life and fronts. *Oceanography*. 1994, 7, 2, 52–60. doi:10.5670/oceanol.1994.03
26. Bakun A. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage. *Scientia Marina*. 2006, 70S2, 105–122.
27. Sentyabov E.V. Experience in using temperature-acoustic sections in international ecosystem surveys to analyze the distribution of pelagic fish in the Norwegian Sea. *Trudy VNIRO*, 2018, 174, 105–111. doi:10.36038/2307-3497-2018-174-105-111
28. Fedorov K.N. The physical nature and structure of oceanic fronts. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1983. 296 p. (in Russian).
29. Liu Y., Minnett P.J. Sampling errors in satellite-derived infrared sea-surface temperatures. Part I: Global and regional MODIS fields. *Remote Sensing of Environment*. 2016, 177, 48–64. doi:10.1016/j.rse.2016.02.026
30. Stark J.D., Donlon C.J., Martin M.J., McCulloch M.E. OSTIA: An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system. *Oceans*. 2007, 061214–029. doi:10.1109/oceanse.2007.4302251
31. Ivshin V.A., Trofimov A.G., Titov O.V. Barents Sea thermal frontal zones in 1960–2017: variability, weakening, shifting. *ICES Journal of Marine Science*. 2019, 76, i3–i9. doi:10.1093/icesjms/fsz159
32. Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Konik A.A., Gordeeva S.M. Comparison of Hydrography Observations with Data of Global Products in the Barents Sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020, 13, 4, 66–77. doi:10.7868/S2073667320040061 (in Russian).
33. Asbjørnsen H., Årthun M., Skagseth Ø., Eldevik T. Mechanisms of ocean heat anomalies in the Norwegian Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019, 124, 2908–2923. doi:10.1029/2018JC014649
34. Oziel L., Sirven J., Gascard J.C. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011). *Ocean Science*. 2016, 12, 1, 169–184. doi:10.5194/os-12-169-2016
35. Korablev A.A. The system of frontal sections of the Norwegian EAZO. *Study of the Role of Energy-Active Zones of the Ocean in Short-Term Climate Fluctuations*. Moscow, VINITI, 380–386 (in Russian).
36. Belkin I.M. Remote sensing of ocean fronts in marine ecology and fisheries. *Remote Sensing*. 2021, 13, 5, 883. doi:10.3390/rs13050883

Об авторах

КОНИК Александр Александрович, младший научный сотрудник, кандидат географических наук, ORCID ID: 0000-0002-2089-158X, Scopus AuthorID: 57203864647, SPIN-код: 5839-1738, e-mail: konikrshu@gmail.com

АТАДЖАНОВА Оксана Алишеровна, научный сотрудник, кандидат географических наук, ORCID ID: 0000-0001-6820-0533, SPIN-код: 5016-2970, e-mail: oksana.atadzhanova@gmail.com

СЕНТЯБОВ Евгений Валериевич, старший научный сотрудник, кандидат географических наук, ORCID ID: 0000-0002-8863-4133, Scopus AuthorID: 14520596600, WoS AuthorID: AES-2062–2022, SPIN-код: 7620-8430, e-mail: esentyabov@yandex.ru