

Обзор исследований по распределению скоплений антарктического криля в море Скотия и анализ мезомасштабной динамики его среды обитания*

Т. В. Белоненко¹, В. С. Травкин^{1,2}, А. В. Кочнев³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, Российская Федерация, 119034, Москва, Кропоткинский пер., 6

³ Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, Российская Федерация, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 17

Для цитирования: Белоненко, Т. В., Травкин, В. С., Кочнев, А. В. (2024). Обзор исследований по распределению скоплений антарктического криля в море Скотия и анализ мезомасштабной динамики его среды обитания. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (1), 108–127. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.106>

В статье изучается мезомасштабная динамика вод моря Скотия, расположенного у северной оконечности Южного океана на его границе с Южной частью Атлантического океана. Море Скотия является одним из наиболее перспективных промысловых районов, где производится промышленный вылов антарктического криля (*Euphausia superba*). Так как распределение промысловых скоплений криля обусловлено во многом океанологическими условиями, в данной работе анализируются мезомасштабная вихревая динамика, фронтальные зоны и топография в море Скотия, влияющие на создание благоприятных океанологических условий для образования промысловых скоплений криля. Исследование проводится с использованием спутниковых и модельных данных. Показано, что распределение уровня моря, по данным реанализа GLORYS12v1, имеет зональный характер. Зимой и весной аномалии уровня моря положительны (до 20 см), а летом и осенью — отрицательны (до –180 см). В северо-западной части моря Скотия, по данным реанализа GLORYS12v1, за 1993–2020 гг. выделяются термические фронтальные зоны, имеющие высокую повторяемость (>80%). Динамические фронтальные зоны также отмечаются в северо-западной части акватории и имеют повторяемость, достигающую 100%. Этот район в море Скотия является наиболее динамически активным: здесь наблюдаются повышенные значения кинетической энергии. Повышенная динамическая активность в северо-западной части моря Скотия, рассмотренная по средним и среднесезонным распределениям характеристик, подтверждается и в синоптическом диапазоне периодов. Пространственные распределения долгоживущих мезомасштабных вихрей, по данным META 3.2 за 1993–2021 гг., показывают области локализации этих вихрей, причем циклонов образуется значительно больше, чем антициклонов. Анализ траекторий этих вихрей позволяет сделать вывод, что направление их распространения преимущественно восточное. Интенсивная вихревая динамика в море Скотия подтверждается также по реконструированным альтиметрическим данным за 1970–1992 гг.

Ключевые слова: море Скотия, криль, *Euphausia superba*, промысел, мезомасштабные вихри, фронты, фронтальные зоны.

* Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 116442164.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2024

1. Введение

В соответствии со Стратегией развития рыбохозяйственного комплекса РФ до 2030 г.¹ планируется существенное увеличение российского вылова объектов водных биоресурсов за пределами собственной исключительной экономической зоны. Одним из наиболее перспективных районов сегодня является море Скотия, расположенное в юго-западной атлантической части Южного океана (рис. 1) и содержащее промысловые ресурсы криля. Море Скотия ограничено с севера, востока и юга Северным хребтом Скотия, Южной Сандвичевой дугой и Южным хребтом Скотия соответственно и открывается к проливу Дрейка на западе. Именно в море Скотия встречаются два важных компонента циркуляции Южного океана: Антарктическое циркумполярное течение и круговорот Уэдделла (Deacon and Moorey, 1975).

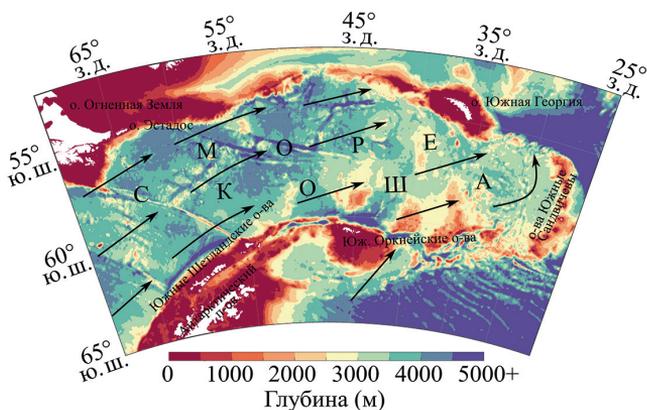


Рис. 1. Батиметрическая карта района исследования. Цветом отмечена глубина (м). Стрелками показаны основные направления течений

Антарктический криль (*Euphausia superba*) — это мелкие ракообразные, которые обитают в водах Антарктики и являются важной пищевой базой для многих видов морских животных, таких как киты, пингвины, тюлени и рыбы. Криль имеет уникальный диетический профиль, богатый белками, жирными кислотами и антиоксидантами, что делает его ценным источником питания и для человека (Boopendranath, 2013). Крилевое масло, полученное из тела криля, часто используется в качестве дополнения к пище для поддержания здоровья сердечно-сосудистой системы, улучшения зрения, уменьшения воспаления и поддержания иммунной системы. Кроме того, антарктический криль имеет важное экологическое значение, поскольку является ключевым элементом в морской пищевой цепи, а также играет роль в утилизации углекислого газа и поддержании биоразнообразия в морских экосистемах (Murphy et al., 2007). Криль распространен в водах Южного океана вокруг всей Антарктиды — от прибрежной зоны континентального шельфа до се-

¹ Доступно на: <https://fish.gov.ru/otraslevaya-deyatelnost/ekonomika-otrasli/strategiya-razvitiya-rybohozyajstvennogo-kompleksa-rossijskoj-federaczii-na-period-do-2030-goda/> [Дата доступа 01.07.2023].

верной границы Антарктической конвергенции. Среда обитания антарктического криля является одной из самых холодных и соленых среди вод Мирового океана. Температура воды может достигать $-1,8^{\circ}\text{C}$, а соленость может превышать 35 ‰ практически везде. Эти условия являются идеальными для антарктического криля, который выживает в такой воде благодаря механизмам физиологической адаптации, таким как высокий уровень жира в своем теле.

Антарктический криль преимущественно живет в прибрежных водах и придонной зоне, как правило, на глубинах от 20 до 200 м, где он питается фитопланктоном и зоопланктоном, однако может быть обнаружен и в более глубоких водах (до 1000 м), где он уклоняется от хищников. Распространение криля и глубина его обитания зависят от вида и сезона. В летние месяцы, когда воды на поверхности океана теплые, криль часто обитает на глубинах, находящихся ближе к поверхности. Это связано с тем, что теплая вода способствует росту фитопланктона, которым питается криль. В летние месяцы фитопланктон склонен подниматься ближе к поверхности, что заставляет и криль перемещаться к верхним слоям воды. Однако зимой, когда на поверхности океана становится гораздо холоднее, криль часто спускается на большие глубины. Объясняется это тем, что зимой фитопланктон не так активен на поверхности, и для криля остается меньше пищи. Кроме того, в зимнее время года криль может также искать более теплые воды на глубинах. В работе (Cresswell et al., 2009) авторы указывают, что вертикальная миграция криля связана с поиском оптимальной глубины, которая является важным способом реагирования криля на окружающую среду. Это проявляется в смертности и питании в короткие промежутки времени и видно как в прогнозах моделей, так и в эмпирических наблюдениях.

Море Скотия и его окрестности давно известны как один из самых биологически богатых районов Южного океана. По данным АНТКОМ, Комиссии по сохранению морских живых ресурсов Антарктики (CCAMLR, 2015), в 2005–2014 гг. на долю криля приходилось 90 % по массе всех видов, являющихся объектами промысла в Южном океане (Silk et al., 2016). Около четверти этой биомассы сосредоточено в море Скотия и южной части пролива Дрейка (Atkinson et al., 2008). Одни из самых высоких показателей численности криля встречаются между Антарктическим полуостровом и Южной Георгией (Marr, 1962; Mackintosh, 1973; Hewitt et al., 2004), что часто совпадает с одним из самых высоких уровней первичной продукции в Южном океане (Korb et al., 2004). Однако существуют факты, свидетельствующие о значительном перемещении криля между различными регионами моря Скотия, особенно с юго-запада вокруг Антарктического полуострова на северо-восток до Южной Георгии (Murphy et al., 2004).

Существует сезонная изменчивость концентрации криля в море Скотия. В работе (Fielding et al., 2012) авторы анализировали косяки криля с использованием методов многочастотного акустического обратного рассеяния и установили, что плотность криля была одинаковой весной ($27.7\text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$) и летом ($27.2\text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$), но ниже ($2.2\text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$) осенью 2009 г. Анализ характеристик косяков показал, что весной высокая средняя плотность криля была результатом небольшого количества стай с высокой плотностью мелкого криля. Летом высокая средняя плотность криля объяснялась большим количеством стай, содержащих небольшое количество крупного криля, а осенью низкая плотность криля была вызвана небольшим количеством

стай, содержащих небольшое количество крупного криля. Стаи криля располагались на средней глубине 58 м весной, 94 м летом и 123 м осенью в море Скотия.

Авторы работы (Fach and Klinck, 2006) изучали циркуляцию моря Скотия и его близлежащих районов с помощью модели HOPS (The Harvard Ocean Prediction System) и подтвердили гипотезу (Everson, 1984), показав, что популяция антарктического криля в Южной Георгии в восточной части моря Скотия поддерживается за счет его миграции из регионов, расположенных западнее. Сравнение смоделированных полей циркуляции с наблюдениями *in situ* в исследовании (Fach and Klinck, 2006) показало совпадение. Поверхностная циркуляция на северо-восток через пролив Дрейка и далее через море Скотия соответствует наблюдениям. Криль от места нереста вдоль континентального шельфа западной части Антарктического полуострова может распространиться через море Скотия в Южную Георгию менее чем за 10 месяцев, а структура Антарктического циркумполярного течения и связанные с ним фронты являются основными факторами, определяющими перенос криля вниз по течению в Южную Георгию (см.: Priddle et al., 1988; Witek et al., 1988; Fach et al., 2006). В море Скотия существуют различные фронтальные зоны, образованные Полярным фронтом и северной и южной ветвями Субантарктического фронта (Orsi et al., 1995; а также см. рис. 5 в работе Belonenko et al., 2020). Во фронтальных зонах более теплые воды смешиваются с холодными водами Антарктики, что создает идеальные условия для роста и размножения криля. Исторические наблюдения за крупномасштабным потоком и фронтальной структурой Антарктического циркумполярного течения в районе моря Скотия исследовались совместно с поверхностным переносом Экмана для создания составного поля течения (Hofmann et al., 1998). Изучение факторов, влияющих на крупномасштабное распространение криля, стало основным направлением исследований в последнее десятилетие, после их анализа был сделан вывод, что эти факторы зависят от производства (пополнения и роста), смертности, удержания и рассредоточения (см. Murphy et al., 2007 и ссылки в ней). Показано, что ключевыми переменными окружающей среды, связанными с распределением и биомассой криля, являются батиметрия, водные течения, границы водных масс, динамика морского льда и доступность пищи (Hofmann et al., 1998; Atkinson et al., 2004; Nicol, 2006; Jarvis et al., 2010), и в ряде исследований эти переменные окружающей среды использовались для описания распределения криля в мезомасштабе (Trathan et al., 2003) и в масштабе бассейна (Atkinson et al., 2008; Tarling et al., 2009).

Наличие островов, подводных гор и хребтов может способствовать образованию холодных и теплых течений, которые, в свою очередь, могут привлекать криль и способствовать его скоплению. Здесь создаются благоприятные условия для роста и размножения фитопланктона, который является основным источником питания криля. Фитопланктон сосредотачивается вблизи островов из-за наличия течений и других факторов. Высокая биомасса криля обычно наблюдается вокруг групп островов и в районе шельфа (Brierley et al., 1999; Lascara et al., 1999; Hewitt et al., 2004), и эти регионы являются местом промысла криля (Jones and Ramm, 2004). Авторы работы (Klevjer et al., 2010) изучили взаимосвязь между близостью суши и характеристиками распределения и скопления антарктического криля в море Скотия в январе и феврале 2003 г. Они показали, что наибольшее медианное число стай на 1 км и акустическая биомасса криля на 1 км были обнаружены в зоне от

50 до 100 км. Однако в зоне от 0 до 50 км наблюдалось значительно большее количество крупных, богатых биомассой скоплений криля по сравнению со всеми другими зонами. Скопления на расстоянии от островов от 0 до 50 км наблюдались значительно дальше друг от друга, чем в других районах. Большинство скоплений располагалось в верхних слоях (до 50 м) в дневное время, хотя ночью в прибрежных районах они были чуть глубже. Криль, вероятно, постоянно перемещается между прибрежной и морской средой на протяжении всей своей жизни. Основным выводом заключается в том, что криль более неоднороден и менее доступен для хищников в прибрежной зоне (<50 км от суши). В зоне от 0 до 50 км наблюдается пик акустической биомассы, хотя наибольшее количество скоплений на 1 км было обнаружено в зоне от 50 до 100 км (Klevjer et al., 2010). Острова могут создавать более защищенную среду для криля от таких хищников, как рыбы и киты. Некоторые острова также служат убежищем для криля от более холодного и нестабильного открытого океана.

Таким образом, повышенная численность криля наблюдается в районах шельфа Антарктического полуострова и вокруг островов Южная Георгия в северо-восточной части моря Скотия — на островных шельфах и склонах шельфа (Atkinson et al., 2008; Grant et al., 2013). В настоящее время промысел ведется на островных шельфах и склонах шельфа. Авторы работы (Murphy et al., 1997) проанализировали пространственное распределение промысла криля в море Скотия за три зимних промысловых сезона с 1993 по 1995 г. и показали, что промысел в основном велся на шельфе и в районах шельфа на северной стороне дуги Скотия. Они использовали данные с пространственным разрешением 0.5° широты на 1.0° долготы и доказали, что именно на участках шельфа и границе шельфа были получены самые высокие уловы. Данные за 1993 г. имелись только по августу, но промысел в этот период ограничивался районом на западной окраине шельфа, где в последующие два сезона промысел был незначительным. В 1994 г. промысел почти полностью велся на большом мелководном участке берега на северо-восточной окраине шельфа, как и в 1995 г., но также велся дальше на запад, в районе берегов, связанных с подводными долинами. Отметим, что такие исследования обычно ограничены и географически, и во времени. Имеется очень мало данных о том, что криль изучался в течение более чем нескольких недель в году. Однако подробные карты района, где был получен крупный улов, все же подчеркивают шельфовую направленность промысла в этих районах.

Повышенные концентрации криля также характерны для районов к востоку от Южных Оркнейских островов. Авторы работы (Murphy et al., 2004) анализировали съемки АНТКОМ 2000 г. совместно с данными модели OCCAM (Ocean Circulation and Climate Advanced Model) и установили лагранжевое перемещение частиц с запада на восток, связанное с основным направлением течения. Но при этом отсутствовала простая связь переноса частиц с каким-либо фронтом Антарктического циркумполярного течения. Однако исследователи подчеркивают (Murphy et al., 2004), что для отслеживания происхождения криля необходимо учитывать не только циркуляцию океана, но и взаимодействие криля с дрейфующим морским льдом. К сожалению, имеется крайне мало информации о том, как криль взаимодействует с покрытыми льдом участками Мирового океана, но имеющиеся данные указывают на вариации, зависящие от характеристик морского льда (см.: Murphy et

al., 2004 и ссылки в этой работе). Возможно, именно лед является причиной отсутствия простых связей между крупномасштабным распределением криля и региональными океанскими фронтами.

Существенное влияние на распределения скоплений криля оказывают вихри. Мезомасштабные вихри создают перемещения водных масс и изменения в течениях, что приводит к изменению условий обитания криля. Вихри влияют на температуру и соленость воды, т. е. изменяют физические свойства воды, такие как плотность и вертикальная циркуляция, а это влияет на распределение пищевых ресурсов в воде, включая фитопланктон, которым питается криль. Недавние исследования показали, что повышение температуры моря снижает численность скоплений криля в море Скотия (Klein et al., 2018). Авторы другой работы (Silk et al., 2016) показали, что самые высокие плотности скоплений криля были обнаружены в местах со слабыми и средними значениями геострофической скорости ($<0.15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$). Это в целом согласуется с результатами исследования (Tarling and Thorpe, 2014) в море Скотия, в котором показано, что более 75% скоплений криля было обнаружено при скоростях течений $<0.3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, с пиковым распределением по скоростям $0.1\text{--}0.2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Поскольку появление криля в открытом океане непредсказуемо, промысел, скорее всего, в ближайшие годы останется в основном прибрежным (Silk et al., 2016). Таким образом, при анализе распределения скопления криля в море Скотия следует учитывать топографию, мезомасштабную вихревую динамику и наличие фронтальных зон.

Целью настоящей работы является совместный анализ мезомасштабной вихревой динамики, фронтальных зон и топографии в море Скотия, влияющих на создание благоприятных океанологических условий для образования промысловых скоплений криля, по спутниковым и модельным данным.

2. Данные

Атлас траекторий мезомасштабных вихрей META3.2 DT. В работе используются данные «Атласа траекторий мезомасштабных вихрей» (Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product — META3.2 DT²), доступные на портале AVISO+. Массив основан на использовании альтиметрической информации (высоты поверхности моря) для идентификации и определения траекторий циклонов и антициклонов Мирового океана (Pegliasco et al., 2022). Алгоритм выделяет изолированные вихревые структуры на ежесуточных картах и в дальнейшем следит за ними, фиксируя их эволюцию во времени. Массив содержит информацию о типе вихрей, их радиусе и амплитуде, скорости вращения, продолжительности жизни. Кроме того, атлас дает для каждого вихря свой идентификационный номер и координаты его траектории. Алгоритм идентифицирует вихри как скопления пикселей (максимальный размер 2000 пикселей), удовлетворяющие определенному набору критериев, таких как: компактность, наличие экстремума аномалий уровня океана внутри вихревой структуры и т. д. Рассматривались данные с 1 января 1993 по 2 августа 2021 г.

² Доступно на: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/value-added-products/global-mesoscale-eddy-trajectory-product.html> [Дата доступа 01.07.2023].

GLORYS12v1. В работе были использованы данные изменчивости уровня моря и *u*- и *v*-составляющих скоростей течений за 1993–2019 гг. глобального океанического реанализа GLORYS12v1³, доступного на портале Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). GLORYS12v1 представляет собой вихре-разрешающий реанализ, базирующийся на гидродинамической модели NEMO. Атмосферный форсинг данной модели задается реанализом ERA-Interim. Спутниковые наблюдения, а также данные дрейфующих буйев, морских глайдеров и *in situ* измерения ассимилируются в реанализ с использованием фильтра Калмана. Физические и ледовые характеристики реанализа GLORYS12v1 по вертикали имеют 50 горизонтов с шагом от 1 м вблизи поверхности до 453 м на последних горизонтах. Пространственное разрешение данных составляет 1/12° по широте и долготе. Рассматривались данные за 1993–2021 гг.

SODA (Simple Ocean Data Assimilation) — климатический реанализ. Данные представляют собой численную реализацию гидродинамической модели океан — атмосфера SODA. При построении набора данных SODA для анализа используются многочисленные источники исходной информации, включающие широкий спектр наблюдений, в том числе ассимилируются измерения температуры поверхности и солёности *in situ*, температуры поверхности моря со спутников и альтиметрические измерения, TS-профили, данные судов погоды, профили World Ocean Atlas-94 (MBT, XBT, CTD), данные автономных буйковых станций. Мы использовали ежемесячные данные за период с 1970 по 1992 г. Модель SODA является вихре-разрешающей, допускающей разрешение $\frac{1}{4} \times \frac{1}{4} \times 50$ -уровней. Мы использовали продукт 3.4.2 SODA (Carton et al., 2000; Carton and Giese, 2008).

Реконструированные данные об уровне моря. Реконструированный набор данных CSEOF (Cyclostationary Empirical Orthogonal Functions) содержит данные об уровне моря, полученные с помощью спутниковой альтиметрии и мареографов с использованием CSEOF. Данные размещаются и обслуживаются центром NASA Jet Propulsion Laboratory Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (JPL PO DAAC). В результате процедуры реконструкции набор данных имеет временное и пространственное разрешение спутниковой альтиметрии. Результирующий реконструированный набор данных об уровне моря имеет недельное временное разрешение и 0.5° пространственное разрешение. Данные представлены в сантиметрах. В работе были использованы данные за 1970–1992 гг. Процедура реконструкции альтиметрических данных описана в работе (Hamlington et al., 2014).

ETOPO1. Для получения информации о рельефе морского дна мы используем обновленную версию глобальной батиметрически-топографической цифровой модели поверхности Земли ETOPO1. В модели комбинируется топография земной поверхности и батиметрия океана, а ее пространственное разрешение составляет 1' по широте и долготе.

3. Результаты

Исследование проводится для двух периодов: 1992–2021 гг. с использованием современных реанализов, а также за 1970–1992 гг. с использованием модельных данных SODA и реконструированных альтиметрических данных (Hamlington et al., 2014).

³ DOI (product): <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

3.1. Анализ океанологической информации за 1993–2021 гг.

На первом этапе анализировалась изменчивость уровня моря и скорости течений. На рис. 2 показаны пространственные распределения высоты поверхности моря Скотия, осредненные за 28-летний период (с 1993 по 2020 г.) (рис. 2, а), а также их среднесезонные аномалии (рис. 2, б–д). На рис. 2, а отмечается зональный характер изменения уровня моря. Видно, что течения направлены преимущественно на восток. Максимальные средние скорости течения достигают на поверхности $80 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, и они приурочены к струям Антарктического циркумполярного течения и связанным с ними фронтами. Вне фронтальных зон скорости течений значительно меньше и не превышают $20 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$.

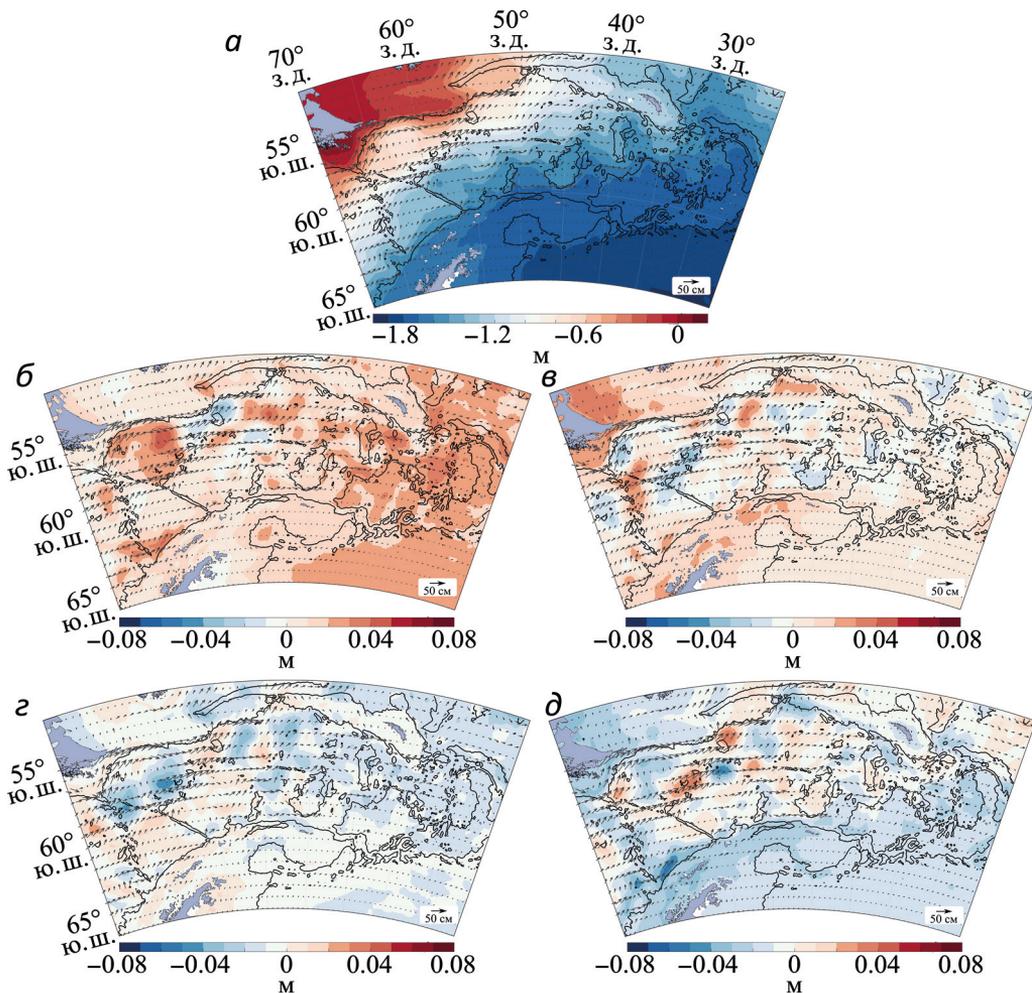


Рис. 2. Осредненные за 1993–2020 гг. по данным GLORYS12v1:

а — высота поверхности моря (м); аномалии высоты поверхности моря (м) за декабрь — февраль (б); март — май (в); июнь — август (г); сентябрь — ноябрь (д). Черными линиями проведены изобаты через каждые 3000 м. Стрелкой показан масштаб скоростей течений

Максимальные значения уровня отмечаются в зимний период (декабрь — февраль). На рис. 2, б видно, что аномалии уровня моря относительно средних значений достигают 8 см и характерны для более северных районов, в частности, для островов Южная Георгия и дуги Южных Сандвичевых островов. В весенний период (рис. 2, в) значения аномалий существенно уменьшаются, однако на большей части акватории остаются положительными. Вдоль глубоководного желоба расположена область отрицательных значений аномалий. В летний период (июнь — август) большая часть акватории характеризуется нулевыми или отрицательными значениями аномалий (рис. 2, г). Противоположный характер аномалий объясняется стерическими эффектами, обусловленными изменением плотности воды за счет температуры и солёности. Похожее распределение аномалий сохраняется для следующего сезона (сентябрь — ноябрь), хотя для осени характерно появление нескольких очагов положительных аномалий в западной части акватории (рис. 2, д). Как мы увидим в дальнейшем, эти локальные экстремумы обусловлены расположением фронтов и наличием в них высоких градиентов температуры и солёности.

На рис. 3 показано расположение термических и динамических фронтальных зон, рассчитанных по градиентам соответствующих характеристик, а также их повторяемость. Методика расчета представлена в работе (Ахтямова и Травкин, 2023). Выделяются термические и динамические фронтальные зоны, соответствующие Полярному фронту и северной и южной ветвям Субантарктического фронта.

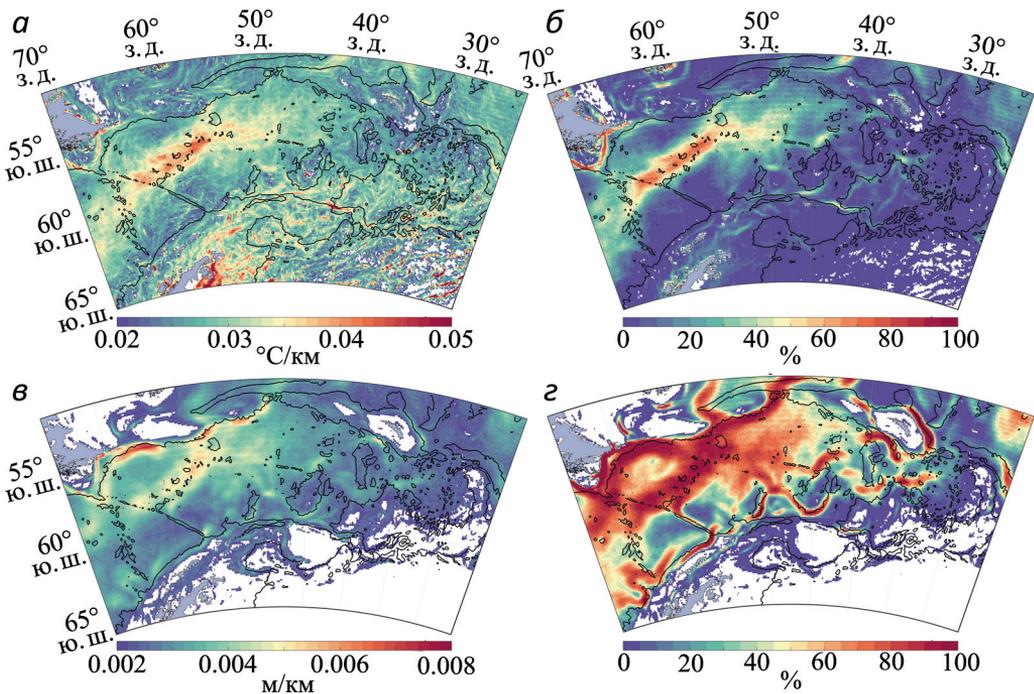


Рис. 3. Осредненные за 1993–2020 гг. по данным GLORYS12v1 градиенты:

а — термических ($^{\circ}\text{C}/\text{км}$); в — динамических ($\text{м}/\text{км}$) фронтальных зон. Повторяемость (%): б — термических; г — динамических фронтальных зон за 1993–2020 гг. Черными линиями проведены изобаты через каждые 3000 м. Белым цветом отмечены области, в которых фронтальных зон не было обнаружено

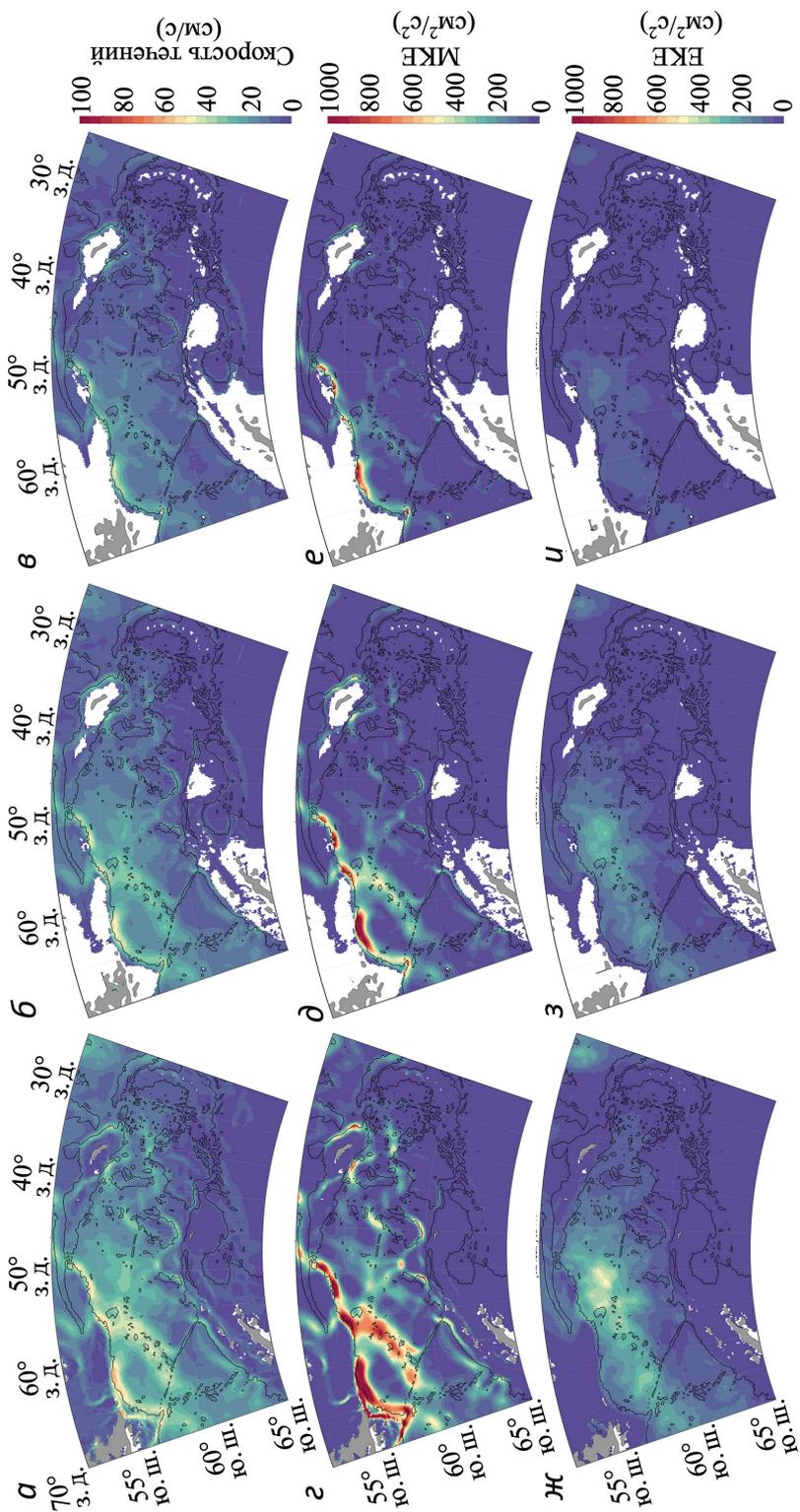


Рис. 4. Осредненные за 1993–2020 гг. оценки скоростей течений по данным GLORYS12v1 на горизонтах: 0 м (а), 453 м (б) и 1062 м (в); средней кинетической энергии (Mean Kinetic Energy, сокр. МКЕ) на 0 м (ж), 453 м (з) и 1062 м (д) и 1062 м (е); вихревой кинетической энергии (Eddy Kinetic Energy, сокр. ЕКЕ) на 0 м (и), 453 м (у) и 1062 м (е). Черными линиями проведены изобаты через каждые 3000 м

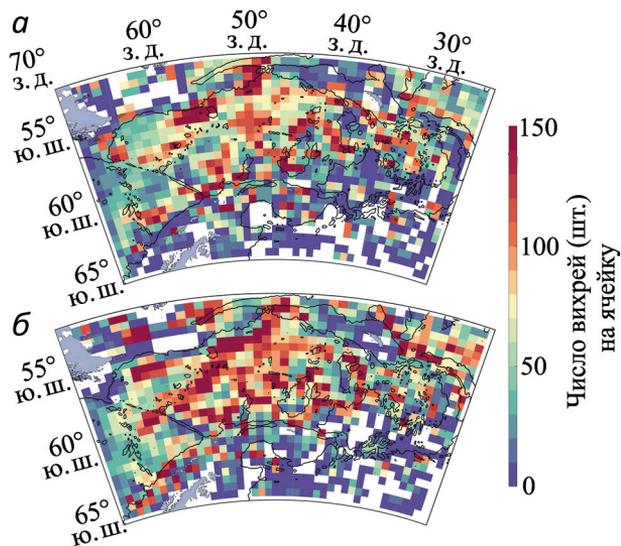


Рис. 5. Распределение долгоживущих (время жизни ≥ 10 сут.) антициклонов (а) и циклонов (б) на ячейку ($0.5^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе) за 1993–2021 гг. по данным МЭТА 3.2. Черными линиями проведены изобаты через каждые 3000 м. Белым цветом отмечены области, в которых вихри не были обнаружены

Пространственное положение фронтальных зон проявляется и в осредненных за 1993–2020 гг. значениях скоростей, а также в распределениях средней и вихревой кинетической энергий.

На рис. 4 показаны средние скорости течений и пространственные распределения средней кинетической и вихревой кинетической энергии на разных горизонтах. Максимальные значения скоростей течений (рис. 4, а–в) и, соответственно, средней кинетической энергии подчеркивают положения Полярного фронта и северной и южной ветвей Субантарктического фронта в море Скотия (рис. 4, г–е), а увеличенные значения вихревой кинетической энергии, расположенные преимущественно в северо-западной части акватории, соответствуют областям динамической активности мезомасштабных вихрей (рис. 4, ж–и). Действительно, на рис. 5 можно увидеть, что в море Скотия образуется множество антициклонических и циклонических вихрей, причем наибольшее число мезомасштабных вихрей генерируется в шельфовых областях или вблизи островов. Отметим, что, судя по изображению на рис. 5, число циклонов превосходит число антициклонов, при этом циклоны образуются в непосредственной близости от Южных Сандвичевых островов и Южной Георгии, а антициклоны — на некотором расстоянии от них, где осуществляется промысел криля. Указанные особенности в локализации вихрей разной полярности также подтверждаются рис. 6, где построены треки этих вихрей по данным МЭТА3.2. Если антициклоны в основном перемещаются в восточном направлении вместе с Антарктическим циркумполярным течением, то циклоны гораздо чаще выбирают противоположное направление перемещения — на запад. Отметим, что как для циклонов, так и для антициклонов характерна топографическая привязка, то есть вихри перемещаются по изобатам.

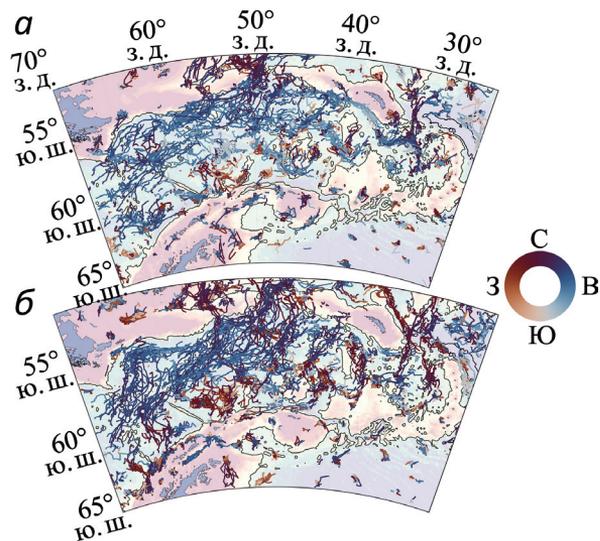


Рис. 6. Траектории долгоживущих (время жизни ≥ 10 сут.) антициклонов (а) и циклонов (б) за 2019–2021 гг. по данным МЕТА 3.2. Цветом показано направление их перемещения. Черными линиями проведены изобаты через каждые 3000 м

3.2. Анализ океанологической информации за 1970–1992 гг.

До появления спутниковых альтиметрических измерений основной информацией об уровне и течениях Мирового океана являются модельные данные. Это также обусловлено тем, что измерения *in situ*, данные дрейферов и буев имеют разрозненный характер. Для моря Скоттия мы рассмотрели два типа данных: это данные климатической модели SODA и реконструированный набор данных CSEOF.

На рис. 7 показаны средние значения уровня за период с 1970 по 1992 г. по данным SODA. При сравнении рис. 7 и 2, а обнаруживается удивительное сходство пространственных распределений высоты поверхности моря за разные периоды. Юго-восточная часть рассматриваемой акватории характеризуется минимальными отрицательными значениями уровня, который постепенно увеличивается в направлении на северо-запад и достигает положительных величин.

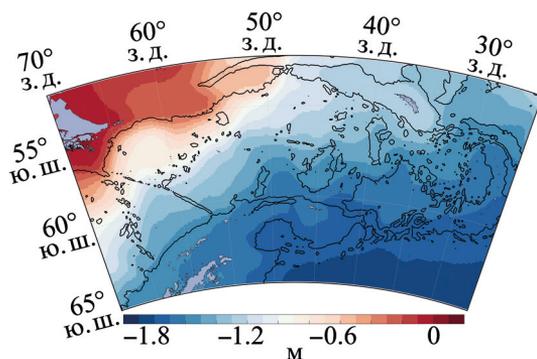


Рис. 7. Высота поверхности моря (см) за 1970–1992 гг. по данным SODA

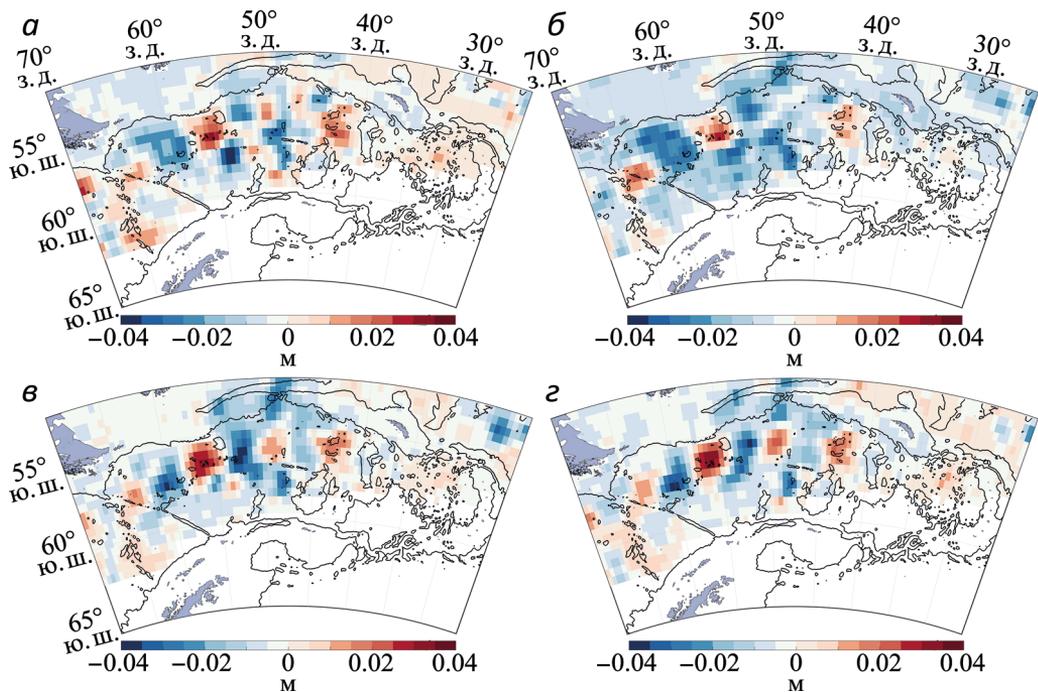


Рис. 8. Осредненные за 1970–1992 гг. реконструированные данные: аномалии высоты поверхности моря (м) за декабрь — февраль (а), март — май (б), июнь — август (в), сентябрь — ноябрь (з). Черными линиями проведены изобаты через каждые 3000 м

Однако распределения среднесезонных аномалий уровня моря, которые показаны на рис. 8, полученные по реконструированному набору данных CSEOF за 1970–1992 гг., не обнаруживают аналогичного сходства с аномалиями уровня моря, построенным по данным GLORYS12v1 за 1993–2020 гг. Это означает, что к показателям, полученным в доальтиметрическую эпоху, нужно относиться с осторожностью. Однако отметим, что распределения среднесезонных аномалий за 1970–1992 гг. отражают усиление мезомасштабной динамической активности в северо-западной части акватории, которое также наблюдается и на рис. 6

4. Обсуждение и выводы

За последние десятилетия в распоряжении исследователей появились новые виды океанологической информации, позволяющие существенно повысить качество научного обеспечения рыболовства в больших по площади океанических районах промысла. Новые океанологические данные широко используются мировым научным сообществом для решения практически важных задач, в том числе для промысловых работ и специализированных научно-поисковых и научно-исследовательских экспедиций. Промысловые запасы криля в море Скотия были открыты и изучены учеными и рыбаками бывшего СССР/РФ. Средний годовой вылов антарктического криля с 1972 по 1991 г. составил около 400 тыс. т. (Чернышков и др., 2022). В настоящее время Российской Федерацией планируется возобновить промысел в море Скотия, которое содержит реально недоиспользуемые биоресурсы.

Это соответствует принятой Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса РФ до 2030 г., согласно которой планируется существенное увеличение российского вылова за пределами собственной исключительной экономической зоны. Море Скотия является одним из наиболее перспективных районов, где планируется осуществлять промысел криля. Для успешного решения этих задач необходимо соответствующее научное обоснование и анализ океанологических условий промысла.

Наряду с изменчивостью фронтов для промыслово-океанологических исследований особую важность представляют исследования мезомасштабных вихрей. Вихри являются благоприятной средой для криля, поскольку в них наблюдаются вертикальные движения биогенов (Микаэлян и др., 2020; Mikaelyan et al., 2023). Действительно, на периферии вихрей могут образовываться фронтальные зоны — области сильных градиентов температуры, солёности и плотности воды, где смешиваются различные водные массы. Фронтальные зоны создают благоприятные условия для образования промысловых скоплений криля, так как во фронтальных зонах обычно обитает большое количество планктона и концентрируются питательные вещества (Микаэлян и др., 2020; Mikaelyan et al., 2023).

Отметим, что в мезомасштабных вихрях любой полярности есть участки, где происходит подъем термоклина к поверхности и, следовательно, создаются предпосылки для увеличения биопродуктивности (Микаэлян и др., 2020). Так, циклонический вихрь создает в своем ядре подъем (куполообразный изгиб) изопикн как в термоклине, так и пикно-халоклине, поднимая нитроклин, что способствует повышению биопродуктивности. В свою очередь, в ядре антициклонического вихря имеет место опускание (прогиб) термоклина и пикно-халоклина, что негативно сказывается на биопродуктивности. При этом на периферии вихря происходит подъем изопикн, что, напротив, способствует увеличению первичной продукции. В отличие от обычного антициклона линзообразный вихрь создает подъем вод выше горизонта максимальной скорости, то есть часто в своей верхней части действует как циклон.

Проанализировав спутниковые и модельные данные для моря Скотия, мы можем сделать следующие выводы.

1. Пространственное распределение уровня моря по данным реанализа GLORYS12v1 за 1993–2020 гг. имеет зональный характер. В северной части уровень моря Скотия имеет положительные значения до 20 см, а в направлении к югу значения уменьшаются почти на два метра, до –180 см.

2. Для зимы и весны в море Скотия характерны положительные значения аномалий уровня, а для лета и осени — преимущественно отрицательные. Между тем на картах пространственных распределений выделяются замкнутые области с противоположными значениями аномалий. Эти области могут характеризовать вихревые процессы и влиять на их периферии на образования промысловых скоплений криля.

3. По реконструированным альтиметрическим данным за 1970–1992 гг. на среднесезонных картах также выделяются замкнутые области аномалий уровня противоположного знака, которые могут соответствовать вихревым структурам. Наибольшая изменчивость наблюдается в северной и центральной частях моря Скотия, где проходят струи Антарктического циркумполярного течения и образуются фронтальные зоны.

4. В северо-западной части моря Скотия, по данным реанализа GLORYS12v1 за 1993–2020 гг. выделяются термические фронтальные зоны, имеющие высокую повторяемость (>80 %). Динамические фронтальные зоны также выделяются в северо-западной части акватории и имеют повторяемость, достигающую 100 %. Расположение этих фронтальных зон зональное.

5. Осредненные за 1993–2020 гг. оценки скоростей течений, по данным GLORYS12v1, а также пространственные распределения средней и вихревой кинетических энергий также характеризуются повышенными значениями в северо-западной части моря Скотия, расположенной рядом с проливом Дрейка. Это означает, что данный район является наиболее динамически активным.

6. Повышенная динамическая активность в северо-западной части моря Скотия, рассмотренная выше по средним и среднесезонным распределениям характеристик, подтверждается и в синоптическом диапазоне периодов. Пространственные распределения долгоживущих мезомасштабных вихрей, по данным МЕТА 3.2 за 1993–2021 гг. показывают области локализации этих вихрей, причем циклонов образуется значительно больше, чем антициклонов. Анализ траекторий этих вихрей показал, что направление их распространения преимущественно восточное.

Литература

- Ахтямова, А. Ф. и Травкин, В. С. (2023). Исследование фронтальных зон Норвежского моря. *Морской гидрофизический журнал*, 39 (1), 67–83. <https://doi.org/10.29039/0233-7584-2023-1-67-83>
- Микаэлян, А. С., Зацепин, А. Г., Кубряков, А. А. (2020). Воздействие мезомасштабной вихревой динамики на биопродуктивность морских экосистем (обзор). *Морской гидрофизический журнал*, 36 (6), 646–675. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-6-646-675>
- Чернышков, П. П., Краснобородько, О. Ю., Чурин, Д. А., Шустин, А. Я. (2022). Современная океанологическая информация в исследованиях среды обитания криля в Атлантической части Антарктики и ставриды — в Южной части Тихого океана, с целью увеличения российского вылова этих объектов. *Рыбное хозяйство*, 1, 4–12. <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2022-1-4-12>
- Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E. A., Rothery, P. (2004). Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432, 100–103.
- Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E. A., Rothery, P., Loeb, V., Ross, R. M., Quetin, L. B., Schmidt, K., Fretwell, P., Murphy, E. J., Tarling, G. A., Fleming, A. H. (2008). Oceanic circumpolar habitats for Antarctic krill. *Marine Ecology Progress Series*, 362, 1–23.
- Belonenko, T., Frolova, A. Gnevyshev, V. (2020). Detection of waveguide for Rossby waves using satellite altimetry in the Antarctic Circumpolar Current. *International Journal of Remote Sensing*, 41 (16), 6232–6247. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1752955>
- Boopendranath, M. R. (2013). Antarctic krill — a keystone species of Antarctica. *Science India*, 16 (2), 4–10.
- Brierley, A. S., Watkins, J. L., Goss, C., Wilkinson, M., Everson, I. (1999). Acoustic estimates of krill density at South Georgia, 1981 to 1998. *CCAMLR Science*, 6, 47–57.
- Carton, J. A., Chepurin, G. A., Cao, X., and Giese, B. S. (2000). A Simple Ocean Data Assimilation analysis of the global upper ocean 1950–95. Part I: Methodology. *J. Phys. Oceanogr.*, 30, 294–309. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)030<0294:ASODAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)030<0294:ASODAA>2.0.CO;2)
- Carton, J. and Giese, B. S. (2008). A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Monthly Weather Review*, 136 (8), 2999–3017. <https://doi.org/10.1175/2007mwr1978.1>
- CCAMLR (2015). *CCAMLR Statistical Bulletin*, Vol. 27 (2005–2014). [online] Доступно на: <https://www.ccamlr.org/en/document/data/ccamlr-statistical-bulletin-vol-27> [Дата доступа 10.10.2015].
- Cresswell, K. A., Tarling, G. A., Thorpe, S. E., Burrows, M. T., Wiedenmann, J., Mangel, M. (2009). Diel vertical migration of Antarctic krill (*Euphausia superba*) is flexible during advection across the Scotia Sea. *Journal of Plankton Research*, 31 (10), 1265–1281. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbp062>
- Deacon, G. E. R. and Moorey, J. A. (1975). The boundary region between currents from the Weddell Sea and Drake Passage. *Deep-Sea Research*, 22, 265–268.

- Everson, I. (1984). Marine interactions. In: R.M. Laws, ed., *Antarctic ecology*. Vol.2. London: Academic Press, 783–819.
- Fach, B. A. and Klinck, J.M. (2006). Transport of Antarctic krill (*Euphausia superba*) across the Scotia Sea. Part I: Circulation and particle tracking simulations. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53 (6), 987–1010. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.03.006>
- Fach, B. A., Hofmann, E. E., Murphy, E. J. (2006). Transport of Antarctic krill (*Euphausia superba*) across the Scotia Sea. Part II: Krill growth and survival. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53 (6), 1011–1043. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.03.007>
- Fielding, S., Watkins, J. L., Collins, M. A., Enderlein, P., Venables, H. J. (2012). Acoustic determination of the distribution of fish and krill across the Scotia Sea in spring 2006, summer 2008 and autumn 2009. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 59–60, 173–188. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.08.002>
- Grant, S. M., Hill, S. L., Fretwell, P. T. (2013). Spatial distribution of management measures, Antarctic krill catch and Southern Ocean bioregions: Implications for conservation planning. *CCAMLR Science*, 20, 1–19.
- Hamlington, B. D., Leben, R. R., Strassburg, M. W., Kim, K.-Y. (2014). Cyclostationary empirical orthogonal function sea-level reconstruction. *Geoscience Data Journal*, 1 (1), 13–19. <https://doi.org/10.1002/gdj3.6>
- Hewitt, R. P., Watkins, J., Naganobu, M., Sushin, V., Brierley, A. S., Demer, D., Kasatkina, S., Takao, Y., Goss, C., Malyshko, A., Brandon, M., Kawaguchi, S., Siegel, V., Trathan, P., Emery, J., Everson, I., Miller, D. (2004). Biomass of Antarctic krill in the Scotia Sea in January/February 2000 and its use in revising an estimate of precautionary yield. *Deep-Sea Research. II*, 51, 1215–1236.
- Hofmann, E. E., Klinck, J. M., Locarnini, R. A., Fach, B., Murphy, E. J. (1998). Krill transport in the Scotia Sea and environs. *Antarctic Science*, 10, 406–415.
- Jarvis, T., Kelly, N., Kawaguchi, S., van Wijk, E., Nicol, S. (2010). Acoustic characterization of the broad-scale distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) off East Antarctica (30–80° E) in January — March 2006. *Deep-Sea Research II*, 57, 916–933.
- Jones, C. D. and Ramm, D. C. (2004). The commercial harvest of krill in the southwest Atlantic before and during the CCAMLR 2000 Survey. *Deep-Sea Research II*, 51, 1421–1434.
- Klein, E. S., Hill, S. L., Hinke, J. T., Phillips, T., Watters, G. M. (2018). Impacts of rising sea temperature on krill increase risks for predators in the Scotia Sea. *PLOS ONE*, 13 (1), e0191011. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191011>
- Klevjer, T. A., Tarling, G. A., Fielding, S. (2010). Swarm characteristics of Antarctic krill *Euphausia superba* relative to the proximity of land during summer in the Scotia Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 409, 157–170. <https://doi.org/10.3354/meps08602>
- Korb, K. E., Whitehouse, M. J., Ward, P. (2004). Sea WiFS in the southern ocean: Spatial and temporal variability in phytoplankton biomass around South Georgia. *Deep-Sea Research. II*, 51, 99–116.
- Lascara, C. M., Hofmann, E. E., Ross, R. R., Quetin, L. B. (1999). Seasonal variability in the distribution of Antarctic krill, *Euphausia superba*, west of the Antarctic Peninsula. *Deep-Sea Research I*, 46, 951–984.
- Mackintosh, N. (1973). Distribution of post-larval krill in the Antarctic. *Discovery Reports.*, 36, 95–156.
- Marr, J. W. S. (1962). The natural history and geography of the Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana). *Discovery Reports*, 32, 33–464.
- Mikaelyan, A. S., Zatsepin, A. G., Kubryakov, A. A., Podymov, O. I., Mosharov, S. A., Pautova, L. A., Fedorov, A. V., Ocherednik, O. A. (2023). Case where a mesoscale cyclonic eddy suppresses primary production: A Stratification-Lock hypothesis. *Progress in Oceanography*, 212, 102984. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.102984>
- Murphy, E. J., Thorpe, S., Watkins, J., Hewitt, R. (2004). Modeling the krill transport pathways in the Scotia Sea: Spatial and environmental connections generating the seasonal distribution of krill. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51 (12–13), 1435–1456. [https://doi.org/10.1016/s0967-0645\(04\)00090-6](https://doi.org/10.1016/s0967-0645(04)00090-6)
- Murphy, E. J., Trathan, P. N., Everson, I., Parkes, G., Daunt, F. (1997). Krill fishing in the Scotia Sea in relation to bathymetry, including the detailed distribution around South Georgia. *CCAMLR Science*, 4, 1–17.
- Murphy, E. J., Watkins, J. L., Trathan, P. N., Reid, K., Meredith, M., Thorpe, S. E., Johnston, N. A., Clarke, A., Tarling, G. A., Collins, M. A., Forcada, J., Shreeve, R., Atkinson, A., Korb, R., Whitehouse, M. A., Ward, P., Rodhouse, P. G., Enderlein, P., Hirst, A., Martin, A., Hill, S., Staniland, I., Pond, D. W.,

- Briggs, D., Cunningham, N. J., Fleming, A. H. (2007). Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: A review of large-scale links in a krill centred food web. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 362, 113–148.
- Nicol, S. (2006). Krill, currents and sea ice: The life cycle of *Euphausia superba* in relation to its changing environment. *Bioscience*, 56, 111–120.
- Orsi, A. H., Whitworth, T., Nowlin, W. D. (1995). On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 42 (5), 641–673. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00021-w](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00021-w)
- Pegliasco, C., Delepoulle, A., Mason, E., Morrow, R., Faugère, Y., Dibarboure, G. (2022). META3.1exp: A new global mesoscale eddy trajectory atlas derived from altimetry. *Earth System Science Data*, 14, 1087–1107. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1087-2022>
- Priddle, J., Croxall, J. P., Everson, I., Heywood, R. B., Murphy, E. J., Prince, P. A., Sear, C. B. (1988). Large-scale fluctuations in distribution and abundance of krill—a discussion of possible causes. In: D. Sahrhage, ed., *Antarctic ocean and resources variability*. Berlin: Springer-Verlag, 169–181.
- Silk, J. R. D., Thorpe, S. E., Fielding, S., Murphy, E. J., Trathan, P. N., Watkins, J. L., Hill, S. L. (2016). Environmental correlates of Antarctic krill distribution in the Scotia Sea and southern Drake Passage. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, 73 (9), 2288–2301. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw097>
- Tarling, G. A. and Thorpe, S. E. (2014). Instantaneous movement of krill swarms in the Antarctic Circumpolar Current. *Limnology and Oceanography*, 59, 872–886.
- Tarling, G. A., Klevjer, T. A., Fielding, S., Watkins, J. L., Atkinson, A., Murphy, E. J., Korb, R., Whitehouse, M. A., Leaper, R. (2009). Variability and predictability of Antarctic krill swarm structure. *Deep-Sea Research I*, 56, 1994–2012.
- Trathan, P. N., Brierley, A. S., Brandon, M. A., Bone, D., Goss, C., Grant, S., Murphy, E. J., Watkins, J. L. (2003). Oceanographic variability and changes in Antarctic krill (*Euphausia superba*) abundance at South Georgia. *Fisheries Oceanography*, 12, 569–583.
- Witek, Z., Kalinowski, J., Grelowski, A. (1988). Formation of Antarctic krill concentrations in relation to hydrodynamic processes and social behavior. In: D. Sahrhage, ed., *Antarctic ocean and resources variability*. Berlin: Springer-Verlag, 237–244.

Статья поступила в редакцию 4 июля 2023 г.
Статья рекомендована к печати 10 ноября 2023 г.

Контактная информация:

Белоненко Татьяна Васильевна — btvlisab@yandex.ru
Травкин Владимир Станиславович — vtravkin99@gmail.com
Кочнев Александр Владимирович — a.v.kochnev@narfu.ru

Review of studies on the distribution of Antarctic krill accumulations in the Scotia Sea and analysis of mesoscale dynamics of its habitat*

T. V. Belonenko¹, V. S. Travkin^{1,2}, A. V. Kochnev³

¹ St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² N. N. Zubov's State Oceanographic Institute,
6, Kropotkinskiy per., Moscow, 119034, Russian Federation

³ Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov,
17, nab. Severnogo Dvini, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

For citation: Belonenko, T. V., Travkin, V. S., Kochnev, A. V. (2024). Review of studies on the distribution of Antarctic krill accumulations in the Scotia Sea and analysis of mesoscale dynamics of its habitat. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (1), 108–127. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.106> (In Russian)

* The study was supported financially by St. Petersburg State University grant no. 116442164.

This article studies the mesoscale dynamics of the waters of the Scotia Sea, located at the northern tip of the Southern Ocean on its border with the Southern Atlantic Ocean. The Scotia Sea is one of the most promising fishing areas where the industrial catch of Antarctic krill (*Euphausia superba*) is produced. Since the distribution of commercial krill accumulations is largely determined by oceanological conditions, this paper analyzes mesoscale vortex dynamics, frontal zones, and topography in the Scotia Sea, affecting the creation of favorable oceanological conditions for the formation of commercial krill accumulations. The study is conducted using satellite and model data. It is shown that the distribution of sea level according to the GLORYS12v1 reanalysis data in the Scotia Sea has a zonal character. In winter and spring, sea level anomalies are positive (up to 20 cm), and in summer and autumn, they are negative (up to -180 cm). In the northwestern part of the Scotia Sea, according to the data of the GLORYS12v1 reanalysis for 1993–2020, thermal frontal zones with high repeatability (>80%) are distinguished. Dynamic frontal zones are also distinguished in the northwestern part of the water area and have a repeatability reaching 100%. This area in the Scotia Sea is the most dynamically active: increased kinetic energy values are observed here. The increased dynamic activity in the northwestern part of the Scotia Sea, considered above by the average and average seasonal distributions of characteristics, is also confirmed in the synoptic range of periods. Spatial distributions of long-lived mesoscale vortices according to META 3.2 data for 1993–2021 show the localization areas of these vortices, with cyclones forming significantly more than anticyclones. Analysis of the trajectories of these vortices showed that the direction of their propagation is mainly eastern. The intense vortex dynamics in the Scotia Sea is also confirmed by reconstructed altimetric data for 1970–1992.

Keywords: Scotia sea, krill, *Euphausia superba*, fishing, mesoscale eddies, fronts, frontal zones.

References

- Akhtyamova, A. F. and Travkin, V. S. (2023). Investigation of Frontal Zones in the Norwegian Sea. *Physical Oceanography*, 30 (1), 62–77. <https://doi.org/10.29039/1573-160X-2023-1-62-77> (In Russian)
- Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E. A., Rothery, P. (2004). Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432, 100–103.
- Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E. A., Rothery, P., Loeb, V., Ross, R. M., Quetin, L. B., Schmidt, K., Fretwell, P., Murphy, E. J., Tarling, G. A., Fleming, A. H. (2008). Oceanic circumpolar habitats for Antarctic krill. *Marine Ecology Progress Series*, 362, 1–23.
- Belonenko, T., Frolova, A. Gnevyshev, V. (2020). Detection of waveguide for Rossby waves using satellite altimetry in the Antarctic Circumpolar Current. *International Journal of Remote Sensing*, 41 (16), 6232–6247. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1752955>
- Boopendranath, M. R. (2013). Antarctic krill — a keystone species of Antarctica. *Science India*, 16 (2), 4–10.
- Brierley, A. S., Watkins, J. L., Goss, C., Wilkinson, M., Everson, I. (1999). Acoustic estimates of krill density at South Georgia, 1981 to 1998. *CCAMLR Science*, 6, 47–57.
- Carton, J. A., Chepurin, G. A., Cao, X., and Giese, B. S. (2000). A Simple Ocean Data Assimilation analysis of the global upper ocean 1950–95. Part I: Methodology. *J. Phys. Oceanogr.*, 30, 294–309. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)030<0294:ASODAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)030<0294:ASODAA>2.0.CO;2)
- Carton, J. and Giese, B. S. (2008). A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Monthly Weather Review*, 136 (8), 2999–3017. <https://doi.org/10.1175/2007mwr1978.1>
- CCAMLR (2015). *CCAMLR Statistical Bulletin*. Vol. 27 (2005–2014). [online] Available at: <https://www.ccamlr.org/en/document/data/ccamlr-statistical-bulletin-vol-27> [Accessed 10.10.2015].
- Chernyshkov, P. P., Krasnoborod'ko, O. Yu., Churin, D. A., Shustin, A. Ya. (2022). Modern oceanological information in studies of the habitat of krill in the Atlantic part of Antarctica and horse mackerel in the South Pacific Ocean, with the aim of increasing the Russian catch of these objects. *Fisheries*, 1, 4–12. <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2022-1-4-12> (In Russian)
- Cresswell, K. A., Tarling, G. A., Thorpe, S. E., Burrows, M. T., Wiedenmann, J., Mangel, M. (2009). Diel vertical migration of Antarctic krill (*Euphausia superba*) is flexible during advection across the Scotia Sea. *Journal of Plankton Research*, 31 (10), 1265–1281. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbp062>

- Deacon, G. E. R. and Moorey, J. A. (1975). The boundary region between currents from the Weddell Sea and Drake Passage. *Deep-Sea Research*, 22, 265–268.
- Everson, I. (1984). Marine interactions. In: R. M. Laws, ed., *Antarctic ecology*. Vol. 2. London: Academic Press, 783–819.
- Fach, B. A. and Klinck, J. M. (2006). Transport of Antarctic krill (*Euphausia superba*) across the Scotia Sea. Part I: Circulation and particle tracking simulations. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53 (6), 987–1010. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.03.006>
- Fach, B. A., Hofmann, E. E., Murphy, E. J. (2006). Transport of Antarctic krill (*Euphausia superba*) across the Scotia Sea. Part II: Krill growth and survival. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53 (6), 1011–1043. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.03.007>
- Fielding, S., Watkins, J. L., Collins, M. A., Enderlein, P., Venables, H. J. (2012). Acoustic determination of the distribution of fish and krill across the Scotia Sea in spring 2006, summer 2008 and autumn 2009. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 59–60, 173–188. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.08.002>
- Grant, S. M., Hill, S. L., and Fretwell, P. T. (2013). Spatial distribution of management measures, Antarctic krill catch and Southern Ocean bioregions: Implications for conservation planning. *CCAMLR Science*, 20, 1–19.
- Hamlington, B. D., Leben, R. R., Strassburg, M. W., Kim, K.-Y. (2014). Cyclostationary empirical orthogonal function sea-level reconstruction. *Geoscience Data Journal*, 1 (1), 13–19. <https://doi.org/10.1002/gdj3.6>
- Hewitt, R. P., Watkins, J., Naganobu, M., Sushin, V., Brierley, A. S., Demer, D., Kasatkina, S., Takao, Y., Goss, C., Malyshko, A., Brandon, M., Kawaguchi, S., Siegel, V., Trathan, P., Emery, J., Everson, I., Miller, D. (2004). Biomass of Antarctic krill in the Scotia Sea in January/February 2000 and its use in revising an estimate of precautionary yield. *Deep-Sea Research II*, 51, 1215–1236.
- Hofmann, E. E., Klinck, J. M., Locarnini, R. A., Fach, B., Murphy, E. J. (1998). Krill transport in the Scotia Sea and environs. *Antarctic Science*, 10, 406–415.
- Jarvis, T., Kelly, N., Kawaguchi, S., van Wijk, E., Nicol, S. (2010). Acoustic characterization of the broad-scale distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) off East Antarctica (30–80° E) in January — March 2006. *Deep-Sea Research II*, 57, 916–933.
- Jones, C. D. and Ramm, D. C. (2004). The commercial harvest of krill in the southwest Atlantic before and during the CCAMLR 2000 Survey. *Deep-Sea Research II*, 51, 1421–1434.
- Klein, E. S., Hill, S. L., Hinke, J. T., Phillips, T., Watters, G. M. (2018). Impacts of rising sea temperature on krill increase risks for predators in the Scotia Sea. *PLOS ONE*, 13 (1), e0191011. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191011>
- Klevjer, T. A., Tarling, G. A., Fielding, S. (2010). Swarm characteristics of Antarctic krill *Euphausia superba* relative to the proximity of land during summer in the Scotia Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 409, 157–170. <https://doi.org/10.3354/meps08602>
- Korb, K. E., Whitehouse, M. J., Ward, P. (2004). Sea WiFS in the southern ocean: Spatial and temporal variability in phytoplankton biomass around South Georgia. *Deep-Sea Research II*, 51, 99–116.
- Lascara, C. M., Hofmann, E. E., Ross, R. R., Quetin, L. B. (1999). Seasonal variability in the distribution of Antarctic krill, *Euphausia superba*, west of the Antarctic Peninsula. *Deep-Sea Research I*, 46, 951–984.
- Mackintosh, N. (1973). Distribution of post-larval krill in the Antarctic. *Discovery Reports*, 36, 95–156.
- Marr, J. W. S. (1962). The natural history and geography of the Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana). *Discovery Reports*, 32, 33–464.
- Mikaelyan, A. S., Zatsepin, A. G., Kubryakov, A. A. (2020). Effect of Mesoscale Eddy Dynamics on Bioproductivity of the Marine Ecosystems (Review). *Physical Oceanography*, 27 (6), 590–618. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2020-6-590-618> (In Russian)
- Mikaelyan, A. S., Zatsepin, A. G., Kubryakov, A. A., Podymov, O. I., Mosharov, S. A., Pautova, L. A., Fedorov, A. V., Ocherednik, O. A. (2023). Case where a mesoscale cyclonic eddy suppresses primary production: A Stratification-Lock hypothesis. *Progress in Oceanography*, 212, 102984. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.102984>
- Murphy, E. J., Thorpe, S., Watkins, J., Hewitt, R. (2004). Modeling the krill transport pathways in the Scotia Sea: Spatial and environmental connections generating the seasonal distribution of krill. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51 (12–13), 1435–1456. [https://doi.org/10.1016/s0967-0645\(04\)00090-6](https://doi.org/10.1016/s0967-0645(04)00090-6)

- Murphy, E. J., Trathan, P. N., Everson, I., Parkes, G., Daunt, F. (1997). Krill fishing in the Scotia Sea in relation to bathymetry, including the detailed distribution around South Georgia. *CCAMLR Science*, 4, 1–17.
- Murphy, E. J., Watkins, J. L., Trathan, P. N., Reid, K., Meredith, M., Thorpe, S. E., Johnston, N. A., Clarke, A., Tarling, G. A., Collins, M. A., Forcada, J., Shreeve, R., Atkinson, A., Korb, R., Whitehouse, M. A., Ward, P., Rodhouse, P. G., Enderlein, P., Hirst, A., Martin, A., Hill, S., Staniland, I., Pond, D. W., Briggs, D., Cunningham, N. J., Fleming, A. H. (2007). Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: A review of large-scale links in a krill centred food web. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 362, 113–148.
- Nicol, S. (2006). Krill, currents and sea ice: The life cycle of *Euphausia superba* in relation to its changing environment. *Bioscience*, 56, 111–120.
- Orsi, A. H., Whitworth, T., Nowlin, W. D. (1995). On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 42 (5), 641–673. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00021-w](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00021-w)
- Pegliasco, C., Delepouille, A., Mason, E., Morrow, R., Faugère, Y., Dibarboure, G. (2022). META3.1exp: A new global mesoscale eddy trajectory atlas derived from altimetry. *Earth System Science Data*, 14, 1087–1107. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1087-2022>
- Priddle, J., Croxall, J. P., Everson, I., Heywood, R. B., Murphy, E. J., Prince, P. A., Sear, C. B. (1988). Large-scale fluctuations in distribution and abundance of krill—a discussion of possible causes. In: D. Sahrhage, ed., *Antarctic ocean and resources variability*. Berlin: Springer-Verlag, 169–181.
- Silk, J. R. D., Thorpe, S. E., Fielding, S., Murphy, E. J., Trathan, P. N., Watkins, J. L., Hill, S. L. (2016). Environmental correlates of Antarctic krill distribution in the Scotia Sea and southern Drake Passage. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, 73 (9), 2288–2301. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw097>
- Tarling, G. A. and Thorpe, S. E. (2014). Instantaneous movement of krill swarms in the Antarctic Circumpolar Current. *Limnology and Oceanography*, 59, 872–886.
- Tarling, G. A., Klevjer, T. A., Fielding, S., Watkins, J. L., Atkinson, A., Murphy, E. J., Korb, R., Whitehouse, M. A., Leaper, R. (2009). Variability and predictability of Antarctic krill swarm structure. *Deep-Sea Research I*, 56, 1994–2012.
- Trathan, P. N., Brierley, A. S., Brandon, M. A., Bone, D., Goss, C., Grant, S., Murphy, E. J., Watkins, J. L. (2003). Oceanographic variability and changes in Antarctic krill (*Euphausia superba*) abundance at South Georgia. *Fisheries Oceanography*, 12, 569–583.
- Witek, Z., Kalinowski, J., Grelowski, A. (1988). Formation of Antarctic krill concentrations in relation to hydrodynamic processes and social behavior. In: D. Sahrhage, ed., *Antarctic ocean and resources variability*. Berlin: Springer-Verlag, 237–244.

Received: July 4, 2023
Accepted: November 10, 2023

Authors' information:

Tatyana V. Belonenko — btvlisab@yandex.ru
Vladimir S. Travkin — vtravkin99@gmail.com
Alexander V. Kochnev — a.v.kochnev@narfu.ru