УДК 551.465

© *Н. В. Сандалюк*, Т. В. Белоненко*

Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Университетская наб., 7–9,
г. Санкт-Петербург, Россия
*E-mail: nikitasandaliuk@gmail.com

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМОХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В РЕГИОНЕ ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИНЫ

Статья поступила в редакцию 27.08.2020, после доработки 06.11.2020

В работе представлены результаты исследования сезонной изменчивости термохалинной структуры циклонических и антициклонических мезомасштабных вихрей для района Лофотенской котловины на основе данных спутниковой альтиметрии и комбинированного массива, соединяющего в себе гидрологические профили с различных платформ. Для термохалинной структуры антициклонических вихрей выявлена сильная сезонная изменчивость, проявляющаяся в заглублении положительных аномалий в летний период, когда ядро принимает линзовидную форму. Показано, что характерной особенностью термохалинной структуры циклонических вихрей в исследуемом регионе является наличие поверхностного слоя с положительными аномалиями солености. Установлено, что зональный вихревой транспорт имеет преимущественно западное направление как в летний, так и в зимний периоды, при этом наблюдается ярко выраженная сезонность, проявляющаяся в интенсификации зонального и меридионального вихревого транспорта в зимний период.

Ключевые слова: Лофотенская котловина, мезомасштабные вихри, спутниковая альтиметрия, Норвежское море, Nordic Seas.

© *N. V. Sandalyuk*, T. V. Belonenko*

St. Petersburg State University, 199034, 7–9, Universitetskaya Emb., St. Petersburg, Russia
*E-mail: nikitasandaliuk@gmail.com

SEASONAL VARIABILITY OF THE THERMOHALINE STRUCTURE OF THE MESOSCALE EDDIES IN THE LOFOTEN BASIN

Received 27.08.2020, in final form 06.11.2020

In this research, we apply the method of colocalization of altimetry data and CTD profiles from multiple platforms (research vessels, autonomous profiling floats, and gliders) to study the seasonal variability of thermohaline structures of cyclonic and anticyclonic eddies in the Lofoten Basin. We demonstrate the thermohaline structure of anticyclonic eddies reveals significant seasonal variability manifesting itself in the deepening of positive anomalies in the summer period and decreasing the vertical extension of the eddy cores. We show that a prominent feature of the thermohaline structure of cyclonic eddies is the positive salinity anomalies in the upper layer. We establish mean zonal eddy-induced transport is generally westward in both summer and winter periods. The pronounced seasonal cycle manifests itself in the intensification of zonal and meridional eddy-induced transport in winter.

Key words: Lofoten Basin, mesoscale eddies, satellite altimetry, Norwegian Sea, Nordic Seas.

1. Введение

В последние годы Лофотенская котловина Норвежского моря, являющаяся частью региона Nordic Seas (см. Приложение), привлекает особенное внимание ученых в связи с обнаружением в ее центре уникального природного феномена — квазипостоянного Лофотенского вихря. Nordic Seas — важный транзитный регион для теплой и соленой атлантической воды на пути к Северному Ледовитому океану. Основным элементом циркуляции вод Норвежского моря является теплое Норвежское течение, которое образует три основных ветви: Норвежское Склоновое течение, Норвежское Фронтальное течение и Норвежское Прибрежное

Ссылка для цитирования: *Сандалюк Н.В.*, *Белоненко Т.В.* Сезонная изменчивость термохалинной структуры мезомасштабных вихрей в регионе Лофотенсокй котловины // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 1. С. 15–30. doi: 10.7868/S2073667321010020

For citation: *Sandalyuk N.V.*, *Belonenko T.V.* Seasonal Variability of the Thermohaline Structure of the Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, 14, 1, 15–30. doi: 10.7868/S2073667321010020

течение (рис. 1). Являясь продолжением мощного Северо-Атлантического течения, Норвежское течение переносит к Северному Ледовитому океану теплую и соленую атлантическую воду, а Лофотенская котловина находится на ее пути в Арктику. Здесь происходят важнейшие процессы трансформации водной массы, оказывая тем самым ключевое влияние на термохалинную циркуляцию и процессы формирования глубинных вод в Северной Атлантике. Форма котловины в виде глубокой чаши и монотонное увеличение глубины к центру (до 3250 м) приводит к увеличению толщины слоя атлантических вод в ее центре, в результате чего скорость переноса вод на север в центре котловины падает, а изопикинические поверхности заглубляются [1]. Мезомасштабные вихри по большей части генерируются из-за нестабильности Норвежского Склонового течения и распространяются по направлению к центральной части котловины. Вихри, отделяющиеся от неустойчивых ветвей Норвежского течения, взаимодействуя друг с другом [2], перемещаются по котловине и переносят тепло и соль в ее центральную часть.

Антициклонический Лофотенский вихрь представляет собой линзу теплой и соленой воды с горизонтальным масштабом около 60–80 км. Линза расположена на глубинах 300–800 м, хотя динамический сигнал вихря прослеживается до самого дна [3–8]. Существование квазипостоянного вихря в Лофотенской котловине подтверждается, как измерениями *in situ* [3, 4, 9, 10], так и спутниковыми данными [11], а также данными гидродинамического моделирования [5–7, 9, 12–14].

Сегодня существует богатый арсенал методов изучения Лофотенского вихря, что позволяет рассматривать его как уникальную природную лабораторию для исследования вихревой динамики. В работе [10] проанализированы материалы океанографических съемок в Лофотенской котловине, выполненные на научно-исследовательском судне ПИНРО «Фритьоф Нансен» в июле 1998, 2000–2002 и 2005 гг., на основании

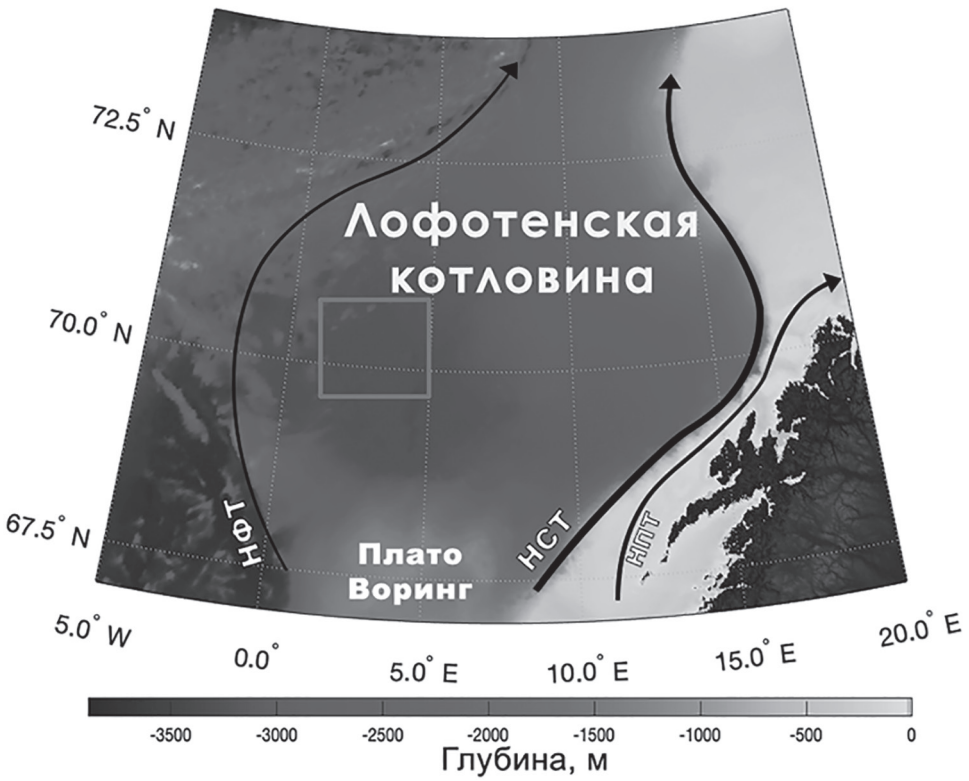

Рис. 1. Район исследования, донная топография показана цветом. Стрелками обозначены основные течения: НФТ — Норвежское Фронтальное течение, НСТ — Норвежское Склоновое течение, НПТ — Норвежское Прибрежное течение. Среднее положение квазистационарного Лофотенского вихря обозначено прямоугольником.

Fig. 1. The Lofoten Basin region with the bathymetry and schematic path of the branches of the Norwegian Current: the Norwegian Atlantic Slope Current, the Norwegian Atlantic Front Current and Norwegian Coastal Current. The box indicates the area where the Lofoten Vortex is generally observed.

чего сделан вывод о том, что гидрологические измерения температуры и солености в рассматриваемый период неплохо соответствуют модельным данным (использовалась модель глобальной циркуляции Массачусетского технологического института, MITgcm). Отметим, что модельные данные MITgcm в дальнейшем успешно применялись при анализе вертикальных составляющих скоростей в Лофотенском вихре [5–7, 13].

Меандрирование ветвей течения, которое имеет ярко выраженный сезонный цикл [15, 16], генерирует преимущественно антициклонические мезомасштабные вихри, которые осуществляют транспорт тёплых и солёных вод к центру котловины, в область расположения Лофотенского вихря [17–19]. Однако циклоны также встречаются в Лофотенской котловине в достаточном количестве, причём самые долгоживущие из них образуются вблизи Лофотенского вихря [18, 19].

Считается, что устойчивость высокой антициклонической завихренности Лофотенского вихря поддерживается эпизодическим слиянием с мезомасштабными антициклонами, отрывающимся от Норвежского Склонового течения вследствие его баротропной и бароклинной неустойчивости, и в целом это способствует поддержанию высокой антициклонической завихренности линзы [12, 13, 20, 21]. Другим механизмом поддержания устойчивости Лофотенского вихря является глубокая зимняя конвекция, способствующей его ежегодной регенерации [1, 4, 14, 20–22].

Исследования количественных характеристик мезомасштабных вихрей Лофотенской котловины, а также их пространственной и временной изменчивости были представлены в работах [17, 18, 23, 24]. В работе [25] было выполнено исследование сезонной изменчивости процессов генерации вихрей, а также изучена сезонная эволюция термохалинных полей в котловине на основе синтеза модельных данных и данных спутниковой альтиметрии. Авторы, в частности, обнаружили сильные отрицательные аномалии термохалинных характеристик в циклонах, образующихся на периферии Лофотенского вихря, и показали, что влияние мезомасштабных вихрей на структуру Лофотенского вихря существенно зависит от сезона.

Исследование [25] относится непосредственно к квазипостоянному Лофотенскому вихрю и не касается других мезомасштабных вихревых структур котловины, которые анализировались позднее в работе [26], где авторы изучали трехмерную структуру мезомасштабных циклонов и антициклонов котловины (область расположения Лофотенского вихря исключалась). Однако в работе [26] изучение их сезонной изменчивости не проводилось. Данная работа восполняет этот пробел. Таким образом, целью настоящей работы является исследование сезонной изменчивости характеристик мезомасштабных вихрей Лофотенской котловины, а также сезонной изменчивости объемов массы, тепла и соли, переносимых вихрями в пределах котловины (область расположения квазипостоянного Лофотенского вихря исключена из анализа).

2. Данные и методы

Для достижения поставленной цели применялся метод сопоставления (Colocation Method) данных спутниковой альтиметрии и CTD-профилей из различных источников (судовые наблюдения, автономные буи, глайдеры) [26]. Этот подход позволяет построить и изучить композитные структуры циклонических и антициклонических вихрей котловины. На основе полученных трехмерных структур рассчитывается транспорт, а также объемы тепла и соли, переносимые вихрями в пределах изучаемого региона в зимний и летний сезоны. Для анализа использовались следующие массивы:

2.1. Массив «Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product»

Для определения местоположения мезомасштабных вихрей и отслеживания траекторий их перемещения используется массив «Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product», основанный на алгоритме автоматической идентификации вихрей [27, 28]. В дальнейшем алгоритм был усовершенствован на основе подхода, описанного в работе [29]. Суть данного алгоритма заключается в следующем: антициклоны в океане выделяются в виде локальных максимумов в поле уровня (SLA, Sea Level Anomaly), включающих все соседние пиксели, чьи значения SLA лежат выше ряда уменьшающихся пороговых значений. Методика выделения циклонов аналогична, с тем лишь отличием, что выделяется локальный минимум в поле SLA [30]. Местоположение каждого центра вихря определяется в виде центроиды, сформированной в поле SLA, внешней границей которой является наиболее удаленный от центра замкнутый контур SLA. Более детальное описание алгоритма можно найти в работах [27–30].

Поддержку и разработку новых версий массива, а также проверку качества данных осуществляет служба Data Unification and Altimeter Combination System (DUACS). В данном исследовании используется версия массива 2.0, выложенная в открытый доступ в сентябре 2018 г. Она содержит обновленные данные,

полученные на основе улучшенной процедуры идентификации вихрей. Сам массив, а также документация с детальным описанием улучшений в алгоритме доступны на сайте www.aviso.altimetry.fr (дата обращения: 01.09.2020). Продукт «Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product» содержит информацию о местоположении и характеристиках выделенных вихрей на каждый день на весь период (на момент публикации массива) альтиметрических измерений (1993–2018 гг.).

2.2. Массив «Hydrography of the Nordic Seas, 2000–2017: A merged product»

Для создания трехмерной композитной структуры мезомасштабных вихрей в районе Лофотенской котловины использовались данные массива «Hydrography of the Nordic Seas, 2000–2017: A merged product» [31]. Массив доступен по ссылке https://doi.org/10.21335/NMDC-1131411242 (дата обращения: 01.09.2020). Этот комбинированный массив включает в себя гидрологические профили из различных источников за период 2000–2017 гг. в пределах 61–80°с.ш. и 17–23°в.д. Судовые CTD-профили были получены из базы данных ICES (International Conference on Environmental Systems) и соединены с данными из NMDC (Norwegian Marine Data Center), а также с данными экспедиционных исследований в Лофотенской котловине. Профили Argo были получены из базы данных Coriolis data center. Также в массиве были использованы данные 10 миссий глайдеров, проведенных в Лофотенской котловине Университетом Бергена (Норвегия). Полученные профили интерполированы на регулярную сетку с шагом 5 м в слое 0–1500 м. Изначальное количество профилей составило 77625. После комбинирования данных из всех источников финальный массив составил 57753 профиля. Детальную информацию по подготовке и обработке данных для массива можно найти в работе [31].

В соответствии с целью исследования, профили, полученные в районе квазистационарного Лофотенского вихря, исключены из исходных данных. Область Лофотенского вихря определялась как 1–5°в.д. и 69–71°с.ш. [9, 32–34].

2.3. Метод построения композитных трехмерных структур мезомасштабных вихрей

Метод сопоставления альтиметрических и *in situ* данных для построения трехмерных структур мезомасштабных вихрей впервые представлен в работе [35] и использовался в целом ряде исследований в различных районах Мирового океана [32, 36–41]. Суть метода состоит в следующем.

Каждый профиль ассоциируется с ближайшим вихрем, если он удовлетворяет следующим критериям:

– профиль и вихрь имеют одинаковую дату наблюдения;

– профиль расположен в пределах расстояния, равного радиусу вихря (R).

Значения радиусов R для каждого отдельного вихря взяты из массива «Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product». Дистанция между расположением профиля и центра вихря нормирована на значения радиуса R. Таким образом, значение 0 соответствует центру вихря, в то время как значение 1 соответствует внешней границе вихря. Данный подход основан на предположении, высказанном в работе [41], которое заключается в том, что для всех вихрей независимо от их амплитуды, полярности или масштаба, характерна одинаковая термохалинная структура, поэтому зависимость ее от радиуса универсальна для вихрей различных пространственных масштабов. Исследования, которые следовали данному подходу, подтвердили его состоятельность [38–41]. Результатом является возможность построения двух композитных для региона вихрей: композитных циклона и антициклона, которые характеризуют общие свойства мезомасштабных вихрей котловины. В нашем исследовании горизонтальный масштаб каждого композитного вихря был увеличен до 1.5 × R в связи с тем, что вихри также могут оказывать значительное влияние на термохалинные характеристики окружающих вод [38, 39].

Выделенные гидрологические профили были разделены на две группы: профили, ассоциированные с антициклоническими вихрями, и профили, ассоциированные с циклоническими вихрями. Каждая из групп была поделена на две дополнительные подгруппы: профили в зимний и летний период. Под зимним периодом подразумевается период октябрь — апрель, под летним — с мая по сентябрь. Количество профилей, расположенных в пределах расстояния от центра антициклонов и циклонов 1.5 R, составило: 741 (антициклоны) и 557 (циклоны) для зимнего периода, 657 (антициклоны) и 515 (циклоны) для летнего периода. На рис. 2 показано распределение выделенных профилей в нормированной системе координат (см. вклейку).

Для исследования термохалинной структуры мезомасштабных вихрей, а также для оценки зонального и меридионального вихревого транспорта были рассчитаны аномалии температуры (T') и солености (S') для каждого выделенного профиля. T'/S'-аномалии рассчитывались путем вычитания среднемесячных ло-

кальных T/S-климатологий из T/S-профилей, ассоциированных с вихрями. Среднемесячная климатология рассчитывалась на основе гидрологических профилей в пределах дистанции 2.5R для каждого отдельного профиля. Для создания трехмерной композитной структуры вихря полученные T'/S'-профили интерполировались на регулярную сетку 0.1 × 0.1R с шагом 5 м при помощи метода объективной интерполяции Барнса с длиной сглаживания 0.5 для вертикальной и горизонтальных осей [41–43].

2.4. Расчет вихревого транспорта

Следуя подходу, представленному в работах [26, 36–38], рассчитан вихревой транспорт массы, тепла и соли, переносимых антициклонами и циклонами в летний и зимний периоды за 2000–2017 гг. Для оценки пространственного зонального и меридионального вихревого транспорта применен подход, представленный в работах [37, 38]. Изучаемый регион разделяется на ячейки, размеры которых определяются с учетом пространственного разрешения данных SLA, а также с учетом разницы в длине дуг параллели и меридиана в регионе.

Для Лофотенской котловины размер ячеек определен как 1 × 0.35°. Для каждой ячейки отслеживается количество вихрей, пересекающих границу ячейки. Зональный транспорт определяется, исходя из числа пересечений западной/восточной границ ячейки, меридиональный — северной/южной границ ячейки. Транспорт (D) рассчитывается по формуле: $D = \frac{VN}{M}$, где V — объем воды, переносимый отдельно взятым композитным вихрем, N — количество вихрей, пересекших границу ячейки, M — период наблюдений. Положительные значения транспорта соответствуют западному и северному направлениям. Для каждой ячейки зональный (меридиональный) вихревой транспорт рассчитывается, как среднее между значениями транспорта для западной и восточной (северной и южной) границ ячейки.

3. Результаты

3.1. Сезонная и межгодовая изменчивость характеристик вихрей

Для анализа сезонной изменчивости характеристик вихрей для каждой ячейки 1 × 35° рассчитывается так называемый максимальный диапазон изменчивости — разница между максимальными и минимальными среднемесячными значениями наблюдаемого параметра. Как видно из рис. 3 (см. вклейку), области с наиболее ярко выраженным сезонным циклом приурочены к району, ограниченному 9–15°в.д., а также к району, прилегающему к области Лофотенского вихря. В стрежне значения максимального диапазона изменчивости вихревых параметров достигают: 12.5 см для амплитуды, 24 см/с для орбитальной скорости и числа 70 для количества наблюденных вихрей (рис. 3, *а*). Важно отметить, что в отличие от других параметров, в пространственном распределении амплитуды (рис. 3, *б*) и орбитальной скорости вихрей (рис. 3, *г*) не отмечается ярко выраженной сезонной цикличности в районе, зато для радиуса вихрей она наблюдается (рис. 3, *в*), а для амплитуды наблюдается лишь отчасти в западной части региона (рис. 3, *б*).

Минимальное количество регистраций вихрей в районе Лофотенской котловины приходится на февраль (рис. 4, *а*) с постепенным возрастанием их числа и максимумом в августе. Наблюдаемый сезонный ход в целом соответствует сезонному ходу для среднемесячных значений числа уникальных (индивидуальных) вихрей, где максимум также приходится на июль — август. На рис. 5, *а* дополнительные максимумы наблюдаются также и в октябре — ноябре, в то время как на рис. 4, *а* они отсутствуют. Это обусловлено тем, что образовавшиеся в осенний период вихри имеют относительно непродолжительный период жизни, что, возможно, связано с разрушением сезонного термоклина.

Отметим, что внутригодовой диапазон изменений среднемесячных значений радиуса вихрей — 6 км весьма незначителен, и стандартное отклонение (1.54 км) составляет всего лишь ~3 % от среднегодового значения (50.52 км). При этом внутримесячная дисперсия радиуса вихрей весьма высока и стандартное отклонение может достигать 22 км в зимние месяцы. Подробный статистический анализ характеристик вихрей в Лофотенской котловине представлен в работах [17, 18, 23].

Видно, что сезонный цикл анализируемых параметров в Лофотенской котловине наиболее ярко выражен для циклонов в среднемесячных значениях амплитуды (рис. 4, *в*) и орбитальной скорости (рис. 4, *г*). Он характеризуется минимальными значениями в летний период, затем идет постепенное увеличение параметров осенью. Для антициклонов такой особенности не наблюдается. В этом проявляются особенности мезомасштабной вихревой динамики котловины, которые требуют дополнительного анализа.

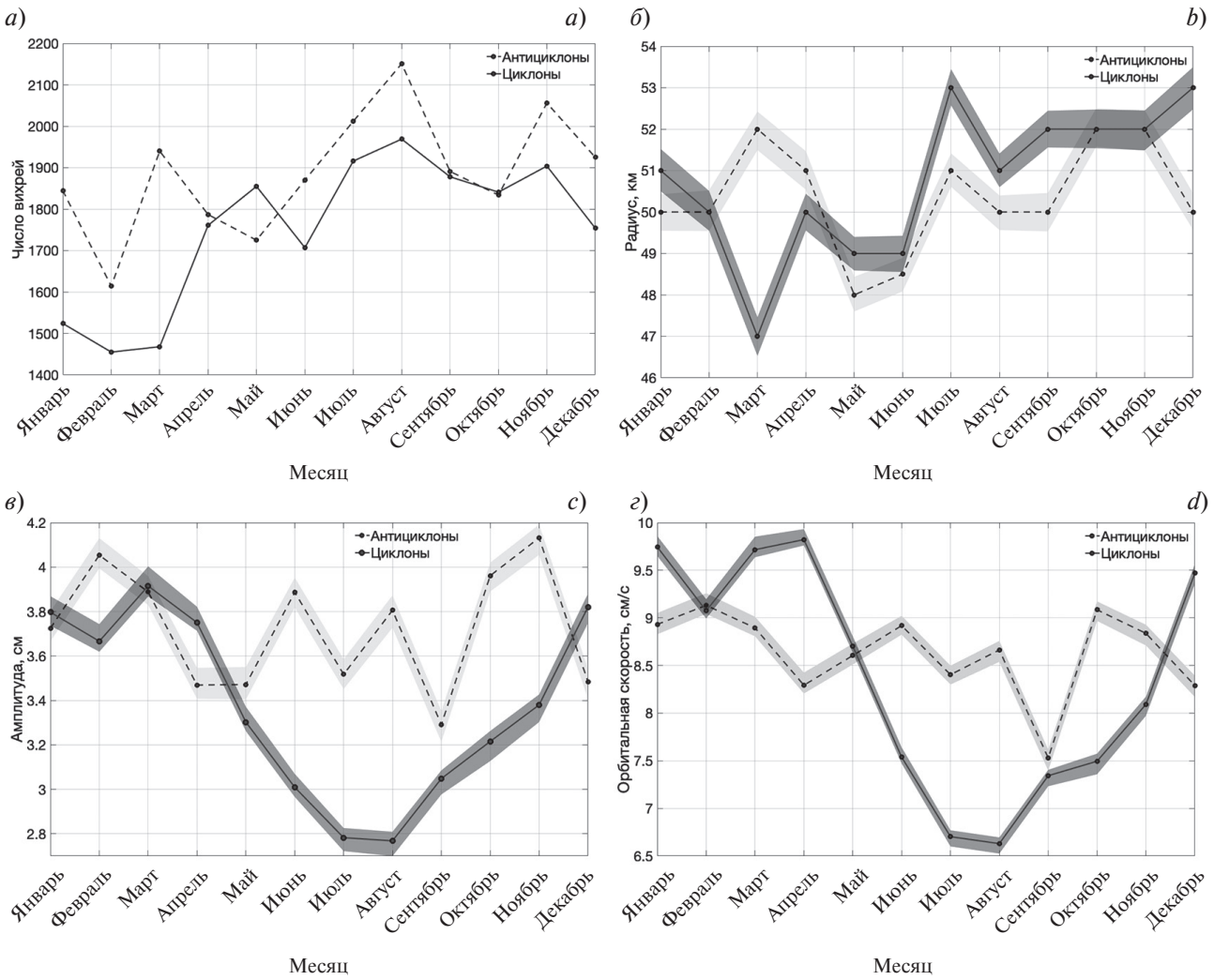

Рис. 4. Сезонная изменчивость числа наблюдений (регистраций) вихрей (*а*), среднемесячных оценок радиуса (*б*), амплитуды (*в*) и орбитальной скорости мезомасштабных вихрей (*г*) в районе Лофотенской котловины за период 1993–2017 гг. Закрашенные области обозначают стандартную ошибку среднего.

Fig. 4. Seasonal variability of the observed eddy amount (*a*) and monthly average of radii (*b*), amplitudes (*c*) and orbital (*d*) of mesoscale eddies in the Lofoten Basin for 1993–2017. Filled areas indicate the root mean square error. Dotted lines indicate anticyclonic eddies, and solid lines indicate cyclonic eddies.

Отметим, что в период январь-март число регистраций вихрей (рис. 4, *а*) и число уникальных вихрей (рис. 5, *а*) минимальны, что, очевидно, обусловлено процессами зимней глубокой конвекции в Лофотенской котловине, когда глубина верхнего перемешанного слоя достигает 400–500 м, а локально в отдельные годы может достигать 1000 м [14, 22].

В сезонной изменчивости числа генераций уникальных циклонов и антициклонов можно выделить минимум в сентябре и дополнительный минимум только для циклонов в феврале (рис. 5, *а*). Для антициклонов в феврале минимум отсутствует. Пока остается неясным, чем обусловлены эти особенности. Отметим, что в целом максимальная сезонная активность процессов генерации вихрей наблюдается в июле — августе и октябре — ноябре, а минимальная — в зимний период и в сентябре. Процессы диссипации вихрей, наоборот, наиболее выражены в зимний период, что связано с увеличением квазиоднородного слоя, разрушением устойчивой стратификации и усилением атмосферного форсинга (ветра).

Характерной особенностью межгодовой изменчивости числа генерации и диссипации вихрей в котловине является резкое уменьшение (почти в два раза) как числа первичных регистраций образовавшихся вихрей, так и их диссипаций в 2012 г. (рис. 6). Если в 2011 г. число образовавшихся индивидуальных вихрей

составляет 45, то в 2012 – 25. Такая особенность межгодовой изменчивости прослеживается как для циклонов, так и для антициклонов (рис. 6, *б*, *в*). Пока остается неясным, почему 2012 г. выделяется на фоне общей изменчивости.

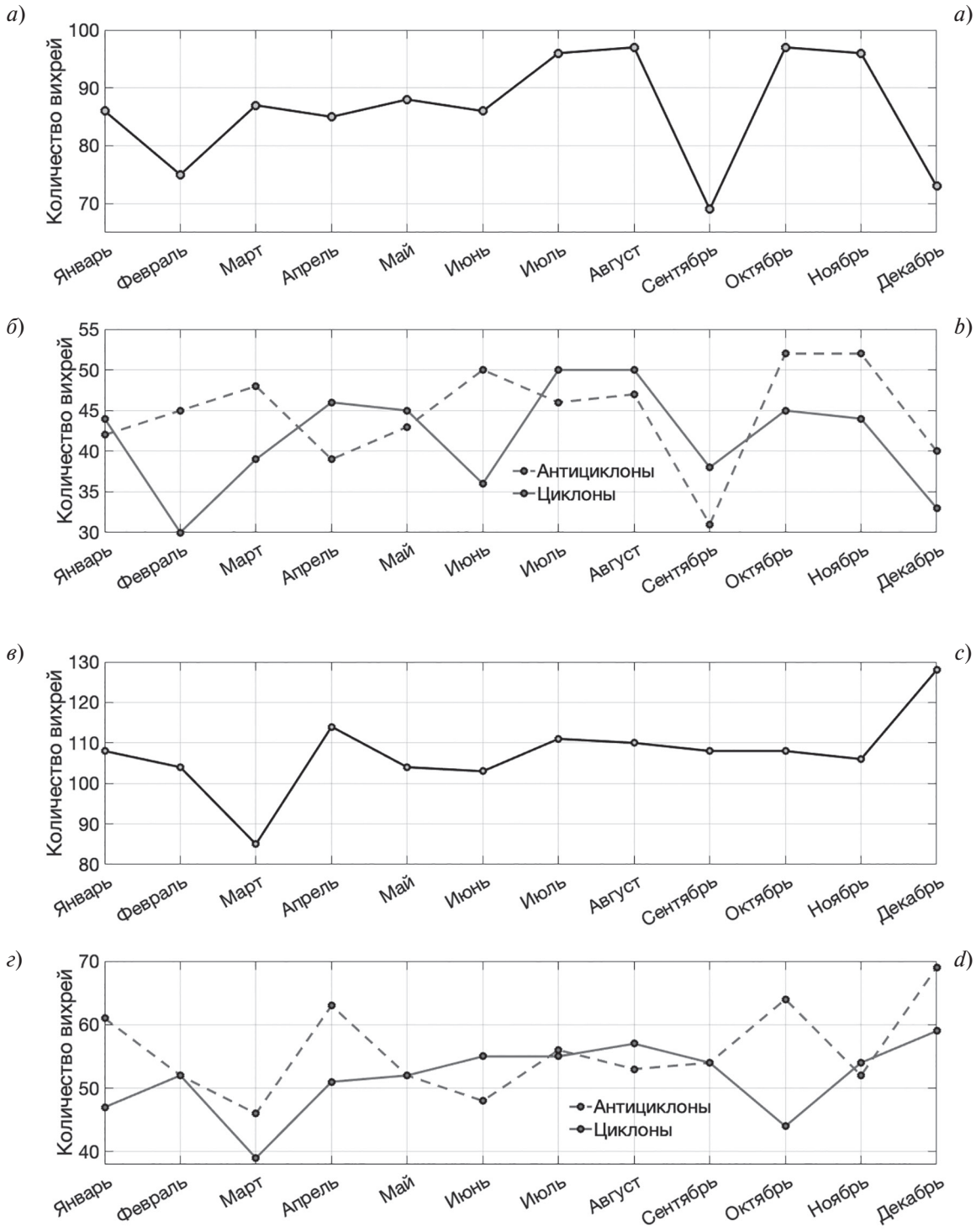

Рис. 5. Сезонная изменчивость событий генераций (*а*, *б*) и диссипаций (*в*, *г*) уникальных вихрей в Лофотенской котловине. Осреднение за период 1993–2017 гг.

Fig. 5. Seasonal variability of generation (*a*, *b*) and dissipation (*c*, *d*) events of the individual eddies in the Lofoten Basin for 1993–2017. Dotted lines indicate anticyclonic eddies, and solid lines indicate cyclonic eddies.

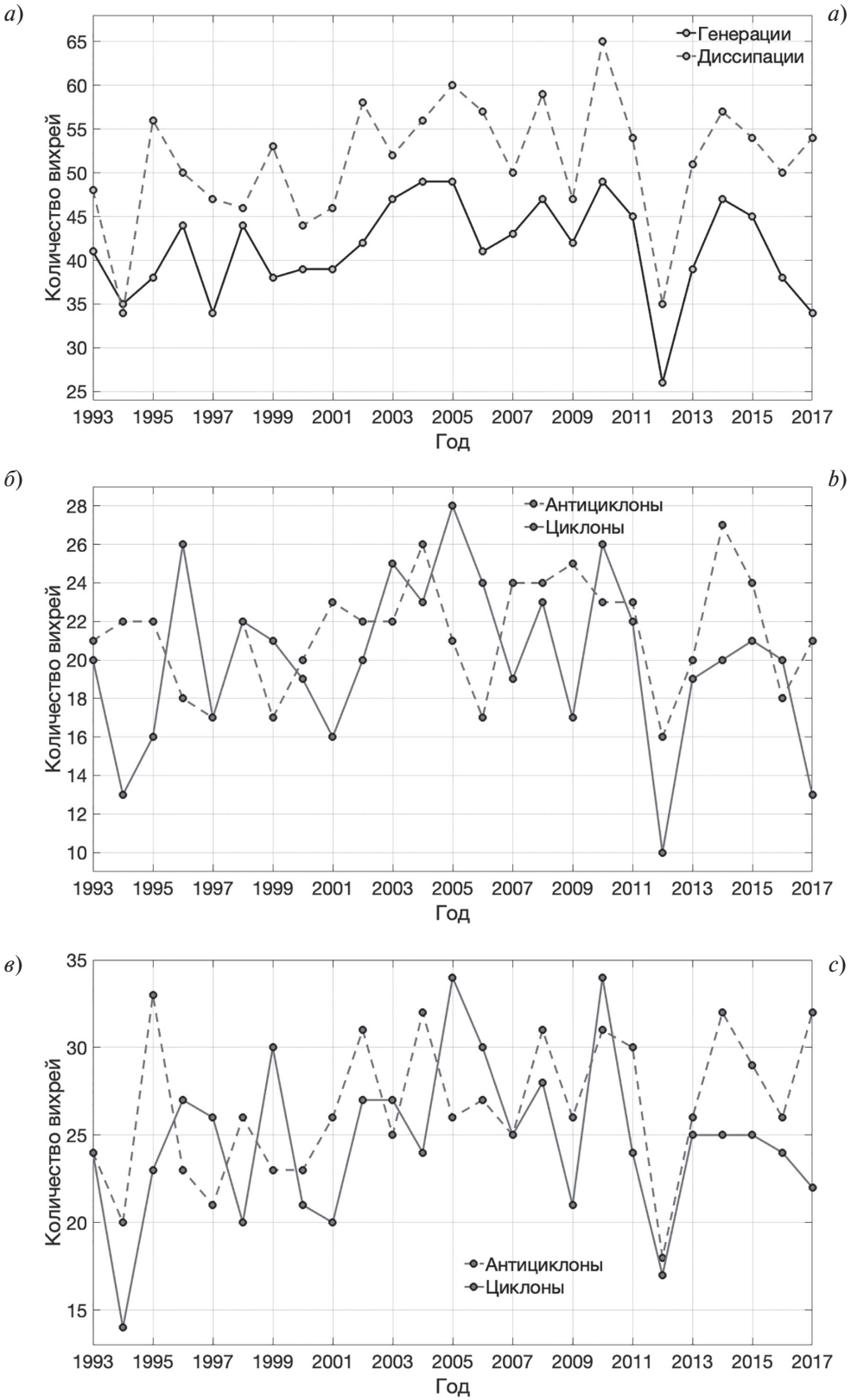

Рис. 6. Межгодовая изменчивость общего числа зафиксированных событий генерации и диссипации уникальных вихрей (*а*), генераций (*б*) и диссипаций (*в*) в районе Лофотенской котловины за период 1993–2017 гг.

Fig. 6. Interannual variability of generation and dissipation events of the individual eddies (*a*), only generation (*b*), and only dissipation (*c*) in the Lofoten Basin for 1993–2017. Dotted lines indicate anticyclonic eddies, and solid lines indicate cyclonic eddies.

3.2. Сезонная изменчивость термохалинной структуры вихрей

С целью анализа сезонной изменчивости термохалинной структуры вихрей Лофотенской котловины построены радиальные разрезы аномалий температуры, солености и плотности в композитных циклоне и антициклоне (п. 2.3) для летнего и зимнего периодов (рис. 7 и 8, см. вклейку). Можно видеть, что значительные аномалии температуры и солености сосредоточены в пределах одного радиуса вихря (1R) и глубины 900 м. Также необходимо отметить, что композитные вихри обеих полярностей оказывают существенное влияние на термохалинные характеристики, как минимум, на дистанции 1.5R.

Положительные аномалии температуры в композитном антициклоне сосредоточены в слое 300–600 м в зимний период (рис. 7, *а*), максимум составил 0.7 °С. В летний период наблюдается значительное заглубление ядра вихря, максимум аномалий (0.8 °С) располагается в пределах глубин 600–650 м (рис. 7, *г*), при этом вертикальная мощность ядра становится существенно меньше. Характер распределения аномалий солености в композитном антициклоне в целом повторяет распределение аномалий температуры с максимумом в 0.03 г/кг на глубине ~400 м в зимний период (рис. 7, *б*) и 0.04 г/кг на глубине ~600 м в летний период. Радиальные разрезы аномалий плотности соответствуют характеру распределения аномалий температуры (рис. 7, *в*, *е*).

Существенная разница вертикальной мощности ядра композитного антициклона между летним и зимним периодами, по всей видимости, вызвана процессами осенне-зимней конвекции, которые оказывают существенное влияние на характер термохалинной структуры мезомасштабных вихрей в исследуемом регионе и служат своеобразной энергетической «подпиткой», способствуя их регенерации и увеличению жизненного цикла [14, 20–22]. В течение летнего периода в результате развития сезонного термоклина ядро вихря становится тоньше и принимает форму линзы (рис. 7, *г*, *д*, *е*).

В термохалинной структуре композитного циклона преобладают отрицательные аномалии температуры и солености и положительные аномалии плотности (рис. 8). В отличие от композитного антициклона, здесь не наблюдается существенных сезонных изменений в характере распределения аномалий и мощности ядра. Ядро композитного циклона расположено в пределах глубин 400–600 м, как в летний, так и в зимний периоды. Минимум T'/S' аномалий составил −1.2 °С/−0.05 г/кг для зимнего и −1.5 °С/−0.06 г/кг для летнего периодов.

На радиальном разрезе аномалий солености до глубины 200 м выделяется слой с положительными аномалиями солености (рис. 8, *б*, *д*). Данный слой практически не проявляется в распределении аномалий температуры и плотности, при этом в распределении аномалий солености он виден, как в летний, так и в зимний периоды, хотя в зимний период мощность данного слоя и максимум аномалий солености существенно меньше. Подобная структура является весьма характерной для мезомасштабных вихрей и неоднократно наблюдалась в различных районах Мирового океана [38, 39, 44–46].

3.3. Сезонная изменчивость вихревого транспорта

Оценки объемов массы, тепла и соли, переносимых мезомасштабными вихрями, а также вклада вихревого транспорта в потоки тепла и соли в котловине осуществлялись на основе построенных композитных структур. Средний радиус антициклонов в исследуемом регионе составляет 55.2 км, циклонов — 55.0 км. Нижняя вертикальная граница для вихрей обеих полярностей оценивается ~900 м. Таким образом, средний объем вихрей составляет 8.62×10^{12} м^3 для антициклонови 8.55×10^{12} м^3 для циклонов (табл. 1). Согласно данным массива «Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product», средняя скорость перемещения антициклонов в котловине равна 0.030 м/с в летний период и 0.040 м/с в зимний период. Для циклонов средняя скорость перемещения составила 0.034 м/с, как в летний, так и зимний периоды. Исходя из этих характеристик, оценки транспорта для композитного антициклона составляют 3.68 Sv для зимнего и 3.08 Sv для летнего периодов, соответственно. Для композитного циклона величина транспорта оценивается одинаково: 3.36 Sv, как для зимнего, так и для летнего периодов.

Общие объемы тепла *HC* и соли *SC*, переносимые композитными вихрями, рассчитываются по формулам [36, 37]:

$$HC = \rho C_p \int T' dxdydz, \tag{1}$$

$$SC = \rho \int S' dxdydz, \tag{2}$$

где C_p — удельная теплоемкость морской воды (Дж × кг$^{-1}$ × К$^{-1}$), ρ — средняя плотность морской воды (кг × м$^{-3}$), T' (°С) — аномалии температуры, S' (г/кг) — аномалии солености. Полученные оценки объемов тепла и соли представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики композитного антициклона и циклона для летнего и зимнего периодов

Characteristics of the composite anticyclonic and cyclonic eddies for the summer and winter seasons

	Зимний период		Летний период	
	Композитный антициклон	Композитный циклон	Композитный антициклон	Композитный циклон
Объем (10^{12} м^3)	8.62	8.55	8.62	8.55
НС (10^{19} Дж)	1.72	−3.16	2.05	−2.85
SC (10^{11} кг)	1.66	−1.56	1.62	−2.00
Транспорт (Sv)	3.68	3.36	3.08	3.36

Для оценки величины зонального/меридионального транспорта, вызванного вихрями, мы применяем подход, представленный в работе [37] и апробированный в [38]. Суть этого подхода заключается в следующем. Для каждой ячейки размером 1 × 0.35° рассчитывается среднее число вихрей N, пересекающих ее зональную/меридиональную границу в положительном (суммируем со знаком «+») и отрицательном (суммируем со знаком «–») направлениях за промежуток времени M; V — объем композитного вихря. Мы считаем, что положительные значения соответствуют западному направлению транспорта, отрицательные — восточному. Тогда зональный/меридиональный вихревой транспорт D для котловины (район квазистационарного Лофотенского вихря исключен) рассчитывается по формуле: $D = \frac{N \times V}{M}$. Результаты представлены на рис. 9 и 10.

Сравнение рисунков 9 и 10 показывает, что зональный вихревой транспорт доминирует относительно меридионального и имеет преимущественно западное (положительное) направление, как в летний, так и в зимний периоды. Этому факту мы предлагаем простое физическое объяснение. Мезомасштабные вихри отрываются от неустойчивого Норвежского течения (преимущественно от Норвежского Склонового течения) и далее под влиянием β-эффекта и с учетом топографического фактора дрейфуют в направлении к центру котловины. Эти результаты хорошо согласуются с представленными в работах [17–19]. На рис. 9 видно, что ячейки с наибольшими положительными значениями зонального транспорта находятся преимущественно в восточной части котловины или расположены с восточной стороны в непосредственной близости от области расположения квазипостоянного Лофотенского вихря. Мезомасштабные антициклонические вихри переносят в центр котловины тепло и соль и являются источником поддержания высокой антициклонической завихренности Лофотенского вихря [12, 14, 17–26]. Отметим, что в зимний период зональный вихревой транспорт (рис. 9, *б*, *г*) превалирует относительно летнего (рис. 9, *а*, *в*), что обусловлено усилением нестабильности восточной ветви Норвежского течения — Норвежского Склонового течения [5, 15], а также усилением в зимний период интенсификации мезомасштабной вихревой активности в регионе. Наиболее существенное увеличение зонального транспорта наблюдается в северо-восточной части котловины: здесь значения достигают максимума в 1.08 Sv/deg² для антициклонических вихрей. В летний период максимальная интенсивность зонального транспорта достигает значений в 0.86 Sv/deg² в центральной части бассейна.

Восточное (отрицательное) направление переноса доминирует в западной части исследуемого региона, что очевидно, связано с неустойчивостью западной ветви Норвежского течения — Норвежского Фронтального течения. Авторы [18, 19] также отмечали усиление мезомасштабной активности западнее области расположения Лофотенского вихря. Наши результаты подтверждают эти исследования. Таким образом, отрицательный вихревой перенос обусловлен мезомасштабными вихрями, отрывающимися от Норвежского Фронтального течения. Однако влияние топографии для этих вихрей противоположно влиянию β-эффекта, вследствие чего восточный транспорт имеет гораздо меньшие значения в ячейках и более локализован. Также отмечается усиление восточного переноса в зимний период по сравнению с летним, особенно для циклонов.

Средние оценки зонального вихревого транспорта антициклонами составляет 0.12 Sv/deg²и 0.08 Sv/deg² для зимнего и летнего и периодов, соответственно. Для циклонов соответствующие оценки равны 0.07 Sv/deg² и 0.08 Sv/deg².

Сравнение рис. 9 и 10 показывает, что общий объем вихревого меридионального транспорта значительно уступает зональному. На рис. 10 видно, что в зимний период также происходит значительное увеличение объемов транспорта, в особенности для антициклонов: более высокие значения характерны для зимнего периода (рис. 10, *б*, *г*) и более низкие — для летнего (рис. 10, *а*, *в*). Средние оценки меридионального вихревого транспорта антициклонами составляют 0.020 Sv/deg² для зимнего и 005 Sv/deg² — для летнего периода.

Для циклонов соответствующие оценки равны 0.01 Sv/deg² и 0.002 Sv/deg². Тем не менее, сезонный контраст значений меридионального транспорта выражен гораздо слабее, чем для зонального. Отметим, что северное направление транспорта наблюдается преимущественно в южной и восточной частях котловины, а также вдоль стрежня Норвежского Склонового течения , в то время как южное направление наблюдается преимущественно в летний период на юго-востоке котловины и в пределах района, ограниченного 9–14°в. д.

Отметим, что зимняя интенсификация антициклонов проявляется, как в расчетах вихревого транспорта для композитных антициклонов: 3.68 Sv в зимний период и 3.08 Sv в летний период (табл. 1), так в пространственном распределении зонального и меридионального транспорта для зимнего и летнего сезонов (рис. 9 и 10, см. вклейку). Тем не менее, объем транспорта тепла антициклоническим композитным вихрем в летний период превышает соответствующую зимнюю оценку: 2.05×10^{19} Дж летом и 1.72×10^{19} Дж зимой.

Очевидно, что интенсификация вихревого транспорта в зимний период напрямую связана с внутригодовой изменчивостью Норвежского течения, обладающего ярко выраженным сезонным циклом. Авторы исследования [15] показали, что объем транспорта Норвежского течения в зимний период почти в два раза превышает соответствующие оценки в летний период, при этом сезонная цикличность наиболее ярко выражена для стрежня Норвежского Склонового течения. Для западной ветви Норвежского течения, Норвежского Фронтального течения, также наблюдаются значительные сезонные колебания значений транспорта [15, 16]. Отметим, что интенсификация этих процессов в зимний период сопровождается активизацией процессов диссипации вихрей в котловине, выявленной в предыдущем разделе (рис. 5, *б*).

4. Заключение и выводы

В рамках представленного исследования на основе данных массива Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product получены оценки сезонной и межгодовой изменчивости характеристик вихрей в регионе Лофотенской котловины. На основе метода сопоставления данных алгоритма автоматической регистрации вихрей и *in situ* измерений построены радиальные термохалинные структуры композитного циклона и антициклона. Получены оценки вихревого транспорта для летнего и зимнего сезонов.

Пространственное распределение диапазона изменчивости характеристик выявляет области с наиболее ярко выраженным сезонным циклом (рис. 3). В стрежне Норвежского Склонового течения значения максимального диапазона достигают: 12.5 см для амплитуды, 24 см/с для орбитальной скорости и числа 70 для количества наблюденных вихрей. В распределении амплитуды и радиуса вихрей не отмечается ярко выраженной сезонной цикличности в районе Норвежского Склонового течения , а для радиуса вихрей она наблюдается в западной части исследуемого региона (рис. 3, *б*).

Наибольшая сезонная активность процессов генерации вихрей наблюдается в июле — августе и октябре — ноябре, а минимальная — в зимний период и в сентябре (рис. 4). Процессы диссипации вихрей наиболее активны в зимний период (рис. 5). Это обусловлено тем, что образовавшиеся в осенний период вихри имеют непродолжительный период жизни, что, возможно, связано с разрушением сезонного термоклина.

Положительные аномалии температуры в композитном антициклоне сконцентрированы в слое 300–600 м в зимний период и 600–650 м в летний период с максимумом в 0.7 и 0.8 °С зимой и летом, соответственно. В летний период наблюдается значительное заглубление ядра вихря, при этом уменьшается его вертикальный масштаб, а ядро принимает линзовидную форму. Характер распределения аномалий солености в композитном антициклоне, в целом, повторяет распределение аномалий температуры с максимумом в 0.03 г/кг на глубине ~400 м в зимний период и 0.04 г/кг на глубине ~600 м в летний период (рис. 7). Существенная разница вертикальной мощности ядра композитного антициклона между летним и зимним сезонами, по всей видимости, вызвана процессами осенне-зимней конвекции, которые оказывают существенное влияние на характер термохалинной структуры мезомасштабных вихрей в котловине.

В термохалинной структуре композитного циклона преобладают отрицательные аномалии температуры и солености и положительные аномалии плотности. Минимум T'/S' аномалий составил –1.2 °С/–0.05 г/кг для зимнего периода и –1.5 °С/–0.06 г/кг — для летнего (рис. 8). Примечательной особенностью термохалинной структуры композитного циклона является наличие поверхностного слоя с положительными аномалиями солености, мощность которого существенно снижается в зимний период. Подобная структура является весьма характерной для мезомасштабных циклонов и неоднократно наблюдалась в различных районах Мирового океана [38, 39, 44–46].

Зональный вихревой транспорт имеет преимущественно западное направление как в летний, так и в зимний периоды, при этом наблюдается ярко выраженная сезонность, проявляющаяся в интенсификации зонального транспорта в зимний период. Общий объем вихревого меридионального транспорта

значительно уступает зональному, а сезонный контраст для меридионального транспорта проявляется гораздо слабее, чем у зонального (рис. 8 и 9). Интенсификация вихревого транспорта в зимний период обусловлена внутригодовой изменчивостью Норвежского течения, обладающего ярко выраженным сезонным циклом.

5. Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 18–17–00027 и гранта РФФИ № 20–05–00066.

Приложение

В зарубежной литературе постоянно мелькает название «Nordic Seas», подразумевающее Норвежское, Гренландское и Исландское моря. По-английски — это «Скандинавские моря», однако на русский язык данное географическое название перевести непросто. Если назвать эту часть Мирового океана «Северо-Европейскими морями», то должно подразумеваться еще и Баренцево море. Англоязычное название часто вызывает вопросы, так что каждый раз придется пояснять, что имеется в виду. Незнакомо нам и Исландское море, под которым подразумевается район к северу от Исландии, ограниченный широтой о-ва Ян Майен (ориентировочно 71°с.ш.) на севере, хребтом Ян Майен на востоке и побережьем Гренландии на западе. Однако, если обратиться к документу Международной Гидрографической организации [47], можно убедиться, что Исландское море в номенклатуре морей и океанов отсутствует и хорошо укладывается в границы южной части Гренландского моря. Поэтому перевод названия «Nordic Seas» на русский язык как «Норвежское и Гренландское моря» будет вполне корректным. Мы акцентируем на этом внимание, чтобы устранить впредь в русскоязычных океанологических статьях различные интерпретации термина «Nordic Seas», который одни авторы определяют как Северо-Европейский бассейн [48], а другие — как Полярные моря [49].

Литература

1. *Новоселова Е.В.*, *Белоненко Т.В.* Изопикническая адвекция в Лофотенской котловине Норвежского моря // Фундам. прикл. гидрофиз. 2020. Т. 13, № 3. С. 56–67. doi: 10.7868/S2073667320030041
2. *Fedorov A.M.*, *Belonenko T.V.* Interaction of mesoscale vortices in the Lofoten Basin based on the GLORYS database // Russ. J. Earth Sci. 2020. V. 20, N2. ES2002. doi: 10.2205/2020ES000694
3. *Иванов В.В.*, *Кораблев А.А.* Формирование и регенерация внутрипикноклинной линзы в Норвежском море // Метеорология и гидрология. 1995. № 9. С. 102–110.
4. *Иванов В.В.*, *Кораблев А.А.* Динамика внутрипикноклинной линзы в Норвежском море // Метеорология и гидрология. 1995. Т. 10. С. 55–62.
5. *Bashmachnikov I.L.*, *Sokolovskiy M.A.*, *Belonenko T.V.*, *Volkov D.L.*, *Isachsen P.E.*, *Carton X.* On the vertical structure and stability of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea // Deep Sea Res. Part I. 2017. V. 128. P. 1–27. doi: 10.1016/j.dsr.2017.08.001
6. *Bashmachnikov I.*, *Belonenko T.*, *Kuibin P.*, *Volkov D.*, *Foux V.* Pattern of vertical velocity in the Lofoten vortex (the Norwegian Sea) // Ocean Dyn. 2018. V. 68, N 12. P. 1711–1725. doi: 10.1007/s10236–018–1213–1
7. *Белоненко Т.В.*, *Башмачников И.Л.*, Колдунов А.В., Куйбин П.А О вертикальной компоненте скорости в Лофотенском вихре Норвежского моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 6. С. 728–737.
8. *Белоненко Т.В.*, *Федоров А.М.* Стерические колебания уровня и глубокая конвекция в Лабрадорском море и море Ирмингера // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 56–69.
9. *Белоненко Т.В.*, *Волков Д.Л.*, *Норден Ю.Е.*, *Ожигин В.К.* Циркуляция вод в Лофотенской котловине Норвежского моря // Вестник СПбГУ. 2014. Сер. 7, № 2. С. 108–121.
10. *Белоненко Т.В.*, *Колдунов А.В.*, *Сентябов Е.В.*, *Карсаков А.Л.* Термохалинная структура Лофотенского вихря Норвежского моря на основе экспедиционных исследований и по данным гидродинамического моделирования // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2018. Т. 63, № 4. С. 502–519. doi: 10.21638/spbu07.2018.406
11. *Volkov D.L.*, *Belonenko T.V.*, *Foux V.R.* Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin — a sub-Arctic hot spot of ocean variability // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40, N 4. P. 738–743. doi: 10.1002/grl.50126
12. *Köhl A.* Generation and stability of a quasi-permanent vortex in the Lofoten Basin // J. Phys. Oceanogr. 2007. V. 37. P. 2637–2651.
13. *Колдунов А.В.*, *Белоненко Т.В.* Гидродинамическое моделирование поля вертикальной скорости в Лофотенском вихре // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2020. Т. 56, № 5. С. 575–585.

14. *Травкин В.С.*, *Белоненко Т.В.* Оценка глубины зимней конвекции в Лофотенской котловине Норвежского моря и методы ее оценки // Гидрометеорология и экология (Ученые записки РГГМУ). 2020. Т. 59. С. 67–83. doi: 10.33933/2074–2762–2020–59–67–83
15. *Mork K.A.*, *Skagseth Ø.* A quantitative description of the Norwegian Atlantic Current by combining altimetry and hydrography // Ocean Sci. 2010. V. 6. P. 901–911. doi: 10.5194/os-6–901–2010
16. *Bosse A.*, *Fer I.* Mean structure and seasonality of the Norwegian Atlantic Front Current along the Mohn Ridge from repeated glider transects // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. P. 13170–13179. doi: 10.1029/2019GL084723
17. *Зинченко В.А.*, *Гордеева С.М.*, *Собко Ю.В.*, *Белоненко Т.В.* Мезомасштабные вихри Лофотенской котловины по спутниковым данным // Фундам. прикл. гидрофиз. 2019. Т. 12, № 3. С. 46–54. doi: 10.7868/S2073667319030067
18. *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 // Adv. in Space Res. 2020. doi: 10.1016/j.asr.2020.05.043
19. *Belonenko T.*, *Zinchenko V.*, *Gordeeva S.*, *Raj R.P.* Evaluation of Heat and Salt Transports by Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin // Russ. J. Earth Sci. 2020. V. 20. doi: 10.2205/2020ES000720
20. *Блошкина Е.В.*, *Иванов В.В.* Конвективные структуры в Норвежском и Гренландском морях по результатам моделирования с высоким пространственным разрешением // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 361. С. 146–168.
21. *Алексеев В.А.*, *Иванов В.В.*, *Репина И.А., Лаврова О.Ю.*, *Станичный С.В.* Конвективные структуры в Лофотенской котловине по данным спутников и буев Арго // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 90–104.
22. *Федоров А.М.*, *Башмачников И.Л.*, *Белоненко Т.В.* Зимняя конвекция в Лофотенской котловине по данным буев Argo и гидродинамического моделирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2019. Т. 64, № 3. С. 491–511. doi: 10.21638/spbu07.2019.308
23. *Raj R.P.*, *Johannessen J.A.*, *Eldevik T.*, *Nilsen J.E.Ø.*, *Halo I.* Quantifying mesoscale eddies in the Lofoten Basin // J. Geophys. Res. Oceans. 2016. V. 121. P. 4503–4521. doi: 10.1002/2016JC011637
24. *Raj R.P.*, *Halo I.* Monitoring the mesoscale eddies of the Lofoten Basin: importance, progress, and challenges // Int. J. Rem. Sens. 2016. V. 37, № 16. P. 3712–3728. doi: 10.1080/01431161.2016.1201234
25. *Travkin V.S.*, *Belonenko T.V.* Seasonal variability of mesoscale eddies of the Lofoten Basin using satellite and model data // Russ. J. Earth Sci. 2020. V. 19. ES5004. doi: 10.2205/2019ES000676
26. *Sandalyuk N.V.*, *Bosse A.*, *Belonenko T.V.* The 3D structure of Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea: A composite analysis from altimetry and in situ data // J. Geophys. Res. Oceans. 2020. 125, e2020JC016331. doi: 10.1029/2020JC016331
27. *Chelton D.B.*, *Schlax M.G.*, *Samelson R.M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Prog. Oceanogr. 2011. V. 91. P. 167–216.
28. Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product Handbook, SALP-MU-P-EA-23126-CLS, issue 3.0 https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_eddytrajectory_META2018.pdf (дата обращения: 01.01.2020).
29. *Williams S.*, *Hecht M.*, *Petersen M.*, *Strelitz R.*, *Maltrud M.*, *Ahrens J.*, *Hlawitschka M.*, *Hamann B.* Visualization and analysis of eddies in a global ocean simulation // Comput. Graphics Forum. 2011. N30. P. 991–1000. doi: 10.1111/j.1467–8659.2011.01948.x
30. *Schlax M.G.*, *Chelton D.B.* The "Growing Method" of Eddy Identification and Tracking in Two and Three Dimensions // College of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, Oregon State University, Corvallis. 2016. P. 1–8.
31. *Bosse A.*, *Fer I.* Hydrography of the Nordic Seas, 2000–2017: A merged product. 2018. doi: 10.21335/NMDC-1131411242
32. *Bosse A.*, *Fer I.*, *Søiland H.*, *Rossby T.* Atlantic water transformation along its poleward pathway across the Nordic Seas // J. Geophys. Res. Oceans. 2018. V. 123. P. 6428–6448. doi: 10.1029/2018JC014147
33. *Yu L.-S.*, *Bosse A.*, *Fer I.*, *Orvik K.A.*, *Bruvik E.M.*, *Hessevik I., Kvalsund K.* The Lofoten Basin eddy: Three years of evolution as observed by Seagliders // J. Geophys. Res. Oceans. 2017. V. 122. P. 6814–6834. doi: 10.1002/2017JC012982
34. *Bosse A.*, *Fer I.*, *Lilly J.M.*, *Søiland H.* Dynamical controls on the longevity of a non-linear vortex: The case of the Lofoten Basin Eddy // Scientific Reports. 2019. V. 9. P. 1–13. doi: 10.1038/s41598–019–49599–8
35. *Willis J.K.*, *Fu L.-L.* Combining altimeter and subsurface float data to estimate the time-averaged circulation in the upper ocean // J. Geophys. Res. Oceans. 2008. V. 113. C12017. doi: 10.1029/2007JC004690
36. *Chaigneau A.*, *Le Texier M.*, *Eldin G.*, *Grados C.*, *Pizarro O.* Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats // J. Geophys. Res. Oceans. 2011. V. 116. C11025. doi: 10.1029/2011JC007134
37. *Yang G.*, *Wang F.*, *Li Y.*, *Lin P.* Mesoscale eddies in the northwestern subtropical Pacific Ocean: Statistical characteristics and three-dimensional structures // J. Geophys. Res. Oceans. 2013. V. 118. P. 1906–1925. doi: 10.1002/jgrc.20164
38. *Dong D.*, *Brandt P.*, *Chang P.*, *Schutte F.*, *Yang X.*, *Yan J.*, *Zeng J.* Mesoscale eddies in the Northwestern Pacific Ocean: Three-dimensional eddy structures and heat/salt transports // J. Geophys. Res. Oceans. 2017. V. 122. P. 9795–9813. doi: 10.1002/2017JC013303

39. *He Q.*, *Zhan H.*, *Cai S.*, *He Y.*, *Huang G.*, *Zhan W.* A new assessment of mesoscale eddies in the South China Sea: Surface features, three-dimensional structures, and thermohaline transports // J. Geophys. Res. Oceans. 2018. V. 123. P. 4906–4929. doi: 10.1029/2018JC014054

40. *Kubryakov A.A.*, *Bagaev A.V.*, *Stanichny S.V.*, *Belokopytov V.N.* Thermohaline structure, transport and evolution of the Black Sea eddies from hydrological and satellite data // Prog. Oceanogr. 2018. V. 167. P. 44–63.

41. *Keppler L.*, *Cravatte S.*, *Chaigneau A.*, *Pegliasco C.*, *Gourdeau L.*, *Singh A.* Observed characteristics and vertical structure of mesoscale eddies in the southwest tropical Pacific // J. Geophys. Res. Oceans. 2018. V. 123. P. 2731–2756. doi: 10.1002/2017JC013712

42. *Zhang Z.*, *Zhang Y.*, *Wang W.*, *Huang R.X.* Universal structure of mesoscale eddies in the ocean // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 3677–3681. doi: 10.1002/grl.50736

43. *Barnes S.L.* Mesoscale objective map analysis using weighted time-series observations // NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-69. 1973. Norman, OK: National Severe Storm Laboratory.

44. *Pegliasco C.A.*, *Chaigneau A.*, *Morrow R.* Main eddy vertical structures observed in the four major Eastern Boundary Upwelling Systems // J. Geophys. Res. Oceans. 2015. V. 120. P. 6008–6033. doi: 10.1002/2015JC010950

45. *Ma J.*, *Xu H.*, *Dong C.*, *Lin P.*, *Liu Y.* Atmospheric responses to oceanic eddies in the Kuroshio Extension region // J. Geophys. Res. Atmos. 2015. V. 120. P. 6313–6330. doi: 10.1002/2014JD022930

46. *Simons R.D.*, *Nishimoto M.M.*, *Washburn L.*, *Brown K.S.*, *Siegel D.A.* Linking kinematic characteristics and high concentrations of small pelagic fish in a coastal mesoscale eddy // Deep Sea Res. Part I. 2015. V. 100. P. 34–47. doi: 10.1016/j.dsr.2015.02.002

47. Limits of Oceans and Seas (Special Publication № 23). International Hydrographic Organization. 1953. 38 p.

48. *Федоров А.М.*, *Башмачников И.Л.*, *Белоненко Т.В.* Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингер // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63, № 3. С. 345–362. doi: 10.21638/spbu07.2018.306

49. *Лебедев К.В.*, *Филюшкин Б.Н.*, *Кожелупова Н.Г.* Водообмен Полярных морей с Атлантическим и Северным Ледовитым океанами на основе наблюдений Арго // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 2. С. 183–197.

References

1. *Novoselova E.V.*, *Belonenko T.V.* Isopycnal advection in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea. *Fundam. Prikl. Gidrofiz.* 2020, 13, 3, 56–67 (in Russian). doi: 10.7868/S2073667320030041

2. *Fedorov A.M.*, *Belonenko T.V.* Interaction of mesoscale vortices in the Lofoten Basin based on the GLORYS database. *Russ. J. Earth Sci.* 2020, 20, 2, ES2002. doi: 10.2205/2020ES000694

3. *Ivanov V.V.*, *Korablev A.A.* Formation and regeneration of the pycnocline lens in the Norwegian Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 1995, 9, 62–69 (in Russian).

4. *Ivanov V.V.*, *Korablev A.A.* Dynamics of an intrapycnocline lens in the Norwegian Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 1995, 10, 55–62 (in Russian).

5. *Bashmachnikov I.L.*, *Sokolovskiy M.A.*, *Belonenko T.V.*, *Volkov D.L.*, *Isachsen P.E.*, *Carton X.* On the vertical structure and stability of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea. *Deep Sea Res. Part I.* 2017, 128, 1–27. doi: 10.1016/j.dsr.2017.08.001

6. *Bashmachnikov I.*, *Belonenko T.*, *Kuibin P.*, *Volkov D.*, *Foux V.* Pattern of vertical velocity in the Lofoten vortex (the Norwegian Sea). *Ocean Dyn.* 2018, 68, 12, 1711–1725. doi: 10.1007/s10236–018–1213–1

7. *Belonenko T.V.*, *Bashmachnikov I.L.*, *Koldunov A.V.*, *Kuibin P.A.* On the vertical component of velocity in the Lofoten vortex of the Norwegian Sea. *Izv. Atmos Ocean Phys.* 2017, 53, 6, 641–649. doi: 10.1134/S0001433817060032

8. *Belonenko T.V.*, *Fedorov A.M.* Steric level fluctuations and deep convection in the Labrador and Irminger Seas. *Izv. Atmos Ocean Phys.* 2018, 54, 9, 1039–1049. doi: 10.1134/S0001433818090086

9. *Belonenko T.V.*, *Volkov D.L.*, *Ozhigin V.K.*, *Norden Yu.*E. Circulation of waters in the Lofoten Basin of the Norwegia Sea. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2014, Ser. 7, 2, 108–121 (in Russian).

10. *Belonenko T.V.*, *Koldunov A.V.*, *Sentyabov E.V.*, *Karsakov A.L.* Thermohaline structure of the Lofoten vortex in the Norwegian sea based on field research and hydrodynamic modeling. *Vestnik of Saint Petersburg University.* 2018, 63, 4, 502–519. doi: 10.21638/spbu07.2018.406

11. *Volkov D.L.*, *Belonenko T.V.*, *Foux V.R.* Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin — a sub-Arctic hot spot of ocean variability. *Geophys. Res. Lett.* 2013, 40, 4, 738–743. doi: 10.1002/grl.50126

12. *Köhl A.* Generation and stability of a quasi-permanent vortex in the Lofoten Basin. *J. Phys. Oceanogr.* 2007, 37, 2637–2651.

13. *Koldunov A.V.*, *Belonenko T.V. H*ydrodynamic Modeling of Vertical Velocities in the Lofoten Vortex. *Izv. Atmos Ocean Phys.* 2020, 56, 5, 502–511. doi: 10.1134/S0001433820040040

14. *Travkin V.S.*, *Belonenko T.V.* Mixed layer depth in winter convection in the Lofoten Basin in the Norwegian Sea and assessment methods. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University)*. 2020, 59, 67–83. (in Russian). doi: 10.33933/2074–2762–2020–59–67–83
15. *Mork K.A.*, *Skagseth Ø.* A quantitative description of the Norwegian Atlantic Current by combining altimetry and hydrography. *Ocean Sci.* 2010, 6, 901–911. doi: 10.5194/os-6–901–2010
16. *Bosse A.*, *Fer I.* Mean structure and seasonality of the Norwegian Atlantic Front Current along the Mohn Ridge from repeated glider transects. *Geophys. Res. Lett.* 2019, 46, 13170–13179. doi: 10.1029/2019GL084723
17. *Zinchenko V.A.*, *Gordeeva S.M.*, *Sobko Y.V.*, *Belonenko T.V.* Analysis of Mesoscale eddies in the Lofoten Basin based on satellite altimetry. *Fundam. Prikl. Gidrofiz.* 2019, 12, 3, 46–54. doi: 10.7868/S2073667319030067
18. *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. *Adv. in Space Res.* 2020. doi: 10.1016/j.asr.2020.05.043
19. *Belonenko T.*, *Zinchenko V.*, *Gordeeva S.*, *Raj R.P.* Evaluation of Heat and Salt Transports by Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin. *Russ. J. Earth Sci.* 2020, 20. doi: 10.2205/2020ES000720
20. *Bloshkina E.V.*, *Ivanov V.V.* Convective structures in the Norwegian and Greenland Seas based on simulation results with high spatial resolution. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2016, 361, 146–168 (in Russian).
21. *Alexeev V.A.*, *Ivanov V.V.*, *Repina I.A.*, *Lavrova O. Yu.*, *Stanichny S.V.* Convective Structures in Lofoten Basin from Remote Sensing Data and Argo Floats. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2016, 1–2, 90–104 (in Russian).
22. *Fedorov A.M.*, *Bashmachnikov I.L.*, *Belonenko T.V.* Winter convection in the Lofoten Basin according to ARGO buoys and hydrodynamic modeling. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2019, 4, 3, 491–511 (in Russian). doi: 10.21638/spbu07.2019.308
23. *Raj R.P.*, *Johannessen J.A.*, *Eldevik T.*, *Nilsen J.E.Ø.*, *Halo I.* Quantifying mesoscale eddies in the Lofoten Basin. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2016, 121, 4503–4521. doi: 10.1002/2016JC011637
24. *Raj R.P.*, *Halo I.* Monitoring the mesoscale eddies of the Lofoten Basin: importance, progress, and challenges. *Int. J. Rem. Sens.* 2016, 37, 16, 3712–3728. doi: 10.1080/01431161.2016.1201234
25. *Travkin V.S.*, *Belonenko T.V.* Seasonal variability of mesoscale eddies of the Lofoten Basin using satellite and model data. *Russ. J. Earth. Sci.* 2020, 19, ES5004. doi: 10.2205/2019ES000676
26. *Sandalyuk N.V.*, *Bosse A.*, *Belonenko T.V.* The 3D structure of Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea: A composite analysis from altimetry and in situ data. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2020, 125, e2020JC016331. doi: 10.1029/2020JC016331
27. *Chelton D.B.*, *Schlax M.G.*, *Samelson R.M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Prog. Oceanogr.* 2011, 91, 167–216.
28. Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product Handbook, SALP-MU-P-EA-23126-CLS, issue 3.0. URL: https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_eddytrajectory_META2018.pdf (date of access: 01.09.2020).
29. *Williams S.*, *Hecht M.*, *Petersen M.*, *Strelitz R.*, *Maltrud M.*, *Ahrens J.*, *Hlawitschka M.*, *Hamann B.* Visualization and analysis of eddies in a global ocean simulation. *Comput. Graphics Forum*. 2011, 30, 991–1000. doi: 10.1111/j.1467–8659.2011.01948.x
30. *Schlax M.G.*, *Chelton D.B.* The "Growing Method" of Eddy Identification and Tracking in Two and Three Dimensionsю College of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, Oregon State University, Corvallis. 2016, 1–8.
31. *Bosse A.*, *Fer I.* Hydrography of the Nordic Seas, 2000–2017: A merged product. 2018. doi: 10.21335/NMDC-1131411242
32. *Bosse A.*, *Fer I.*, *Søiland H.*, *Rossby T.* Atlantic water transformation along its poleward pathway across the Nordic Seas. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2018, 123, 6428–6448. doi: 10.1029/2018JC014147
33. *Yu L.-S.*, *Bosse A.*, *Fer I.*, *Orvik K.A.*, *Bruvik E.M.*, *Hessevik I.*, *Kvalsund K.* The Lofoten Basin eddy: Three years of evolution as observed by Seagliders. *J. Geophys. Res. Oceans.* 2017, 122, 6814–6834. doi: 10.1002/2017JC012982
34. *Bosse A.*, *Fer I.*, *Lilly J.M.*, *Søiland H.* Dynamical controls on the longevity of a non-linear vortex: The case of the Lofoten Basin Eddy. *Scientific Reports.* 2019, 9, 1–13. doi: 10.1038/s41598–019–49599–8
35. *Willis J.K.*, *Fu L.-L.* Combining altimeter and subsurface float data to estimate the time-averaged circulation in the upper ocean. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2008, 113. doi: 10.1029/2007JC004690
36. *Chaigneau A.*, *Le Texier M.*, *Eldin G.*, *Grados C.*, *Pizarro O.* Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2011, 116. doi: 10.1029/2011JC007134
37. *Yang G.*, *Wang F.*, *Li Y.*, *Lin P.* Mesoscale eddies in the northwestern subtropical Pacific Ocean: Statistical characteristics and three-dimensional structures. *J. Geophys. Res. Oceans.* 2013, 118, 1906–1925. doi: 10.1002/jgrc.20164
38. *Dong D.*, *Brandt P.*, *Chang P.*, *Schutte F.*, *Yang X.*, *Yan J.*, *Zeng J.* Mesoscale eddies in the Northwestern Pacific Ocean: Three-dimensional eddy structures and heat/salt transports. *J. Geophys. Res. Oceans.* 2017, 122, 9795–9813. doi: 10.1002/2017JC013303

39. *He Q.*, *Zhan H.*, *Cai S.*, *He Y.*, *Huang G.*, *Zhan W.* A new assessment of mesoscale eddies in the South China Sea: Surface features, three-dimensional structures, and thermohaline transports. *J. Geophys. Res. Oceans.* 2018, 123, 4906–4929. doi: 10.1029/2018JC014054
40. *Kubryakov A.A.*, *Bagaev A.V.*, *Stanichny S.V.*, *Belokopytov V.N.* Thermohaline structure, transport and evolution of the Black Sea eddies from hydrological and satellite data. *Prog. Oceanogr.* 2018, 167, 44–63.
41. *Keppler L.*, *Cravatte S.*, *Chaigneau A.*, *Pegliasco C.*, *Gourdeau L.*, *Singh A.* Observed characteristics and vertical structure of mesoscale eddies in the southwest tropical Pacific. *J. Geophys. Res. Oceans.* 2018, 123, 2731–2756. doi: 10.1002/2017JC013712
42. *Zhang Z.*, *Zhang Y.*, *Wang W.*, *Huang R.X.* Universal structure of mesoscale eddies in the ocean. *Geophys Res Lett.* 2013, 40, 3677–3681. doi: 10.1002/grl.50736
43. *Barnes S.L.* Mesoscale objective map analysis using weighted time-series observations. *NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-69.* 1973, Norman, OK: National Severe Storm Laboratory.
44. *Pegliasco C.A.*, *Chaigneau A.*, *Morrow R.* Main eddy vertical structures observed in the four major Eastern Boundary Upwelling Systems. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2015, 120, 6008–6033. doi: 10.1002/2015JC010950
45. *Ma J.*, *Xu H.*, *Dong C.*, *Lin P.*, *Liu Y.* Atmospheric responses to oceanic eddies in the Kuroshio Extension region. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015, 120, 6313–6330. doi: 10.1002/2014JD022930
46. *Simons R.D.*, *Nishimoto M.M.*, *Washburn L.*, *Brown K.S., Siegel D.A.* Linking kinematic characteristics and high concentrations of small pelagic fish in a coastal mesoscale eddy. *Deep Sea Res. Part I.* 2015, 100, 34–47. doi: 10.1016/j.dsr.2015.02.002
47. Limits of Oceans and Seas (Special Publication № 23). International Hydrographic Organization. 1953. 38 p.
48. *Fedorov A.M.*, *Bashmachnikov I.L.*, *Belonenko T.V.* Localization of areas of deep convection in the Nordic seas, the Labrador Sea and the Irminger Sea. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2018, 63, 3, 345–362 (in Russian). doi: 10.21638/spbu07.2018.306
49. *Lebedev K.V.*, *Filyushkin B.N.*, *Kozhelupova N.G.* Argo-based study of water, heat, and salt exchange between Atlantic, Nordic Seas, and Arctic Ocean. *J. Oceanolog. Res.* 2019, 47, 2, 183–197 (in Russian).

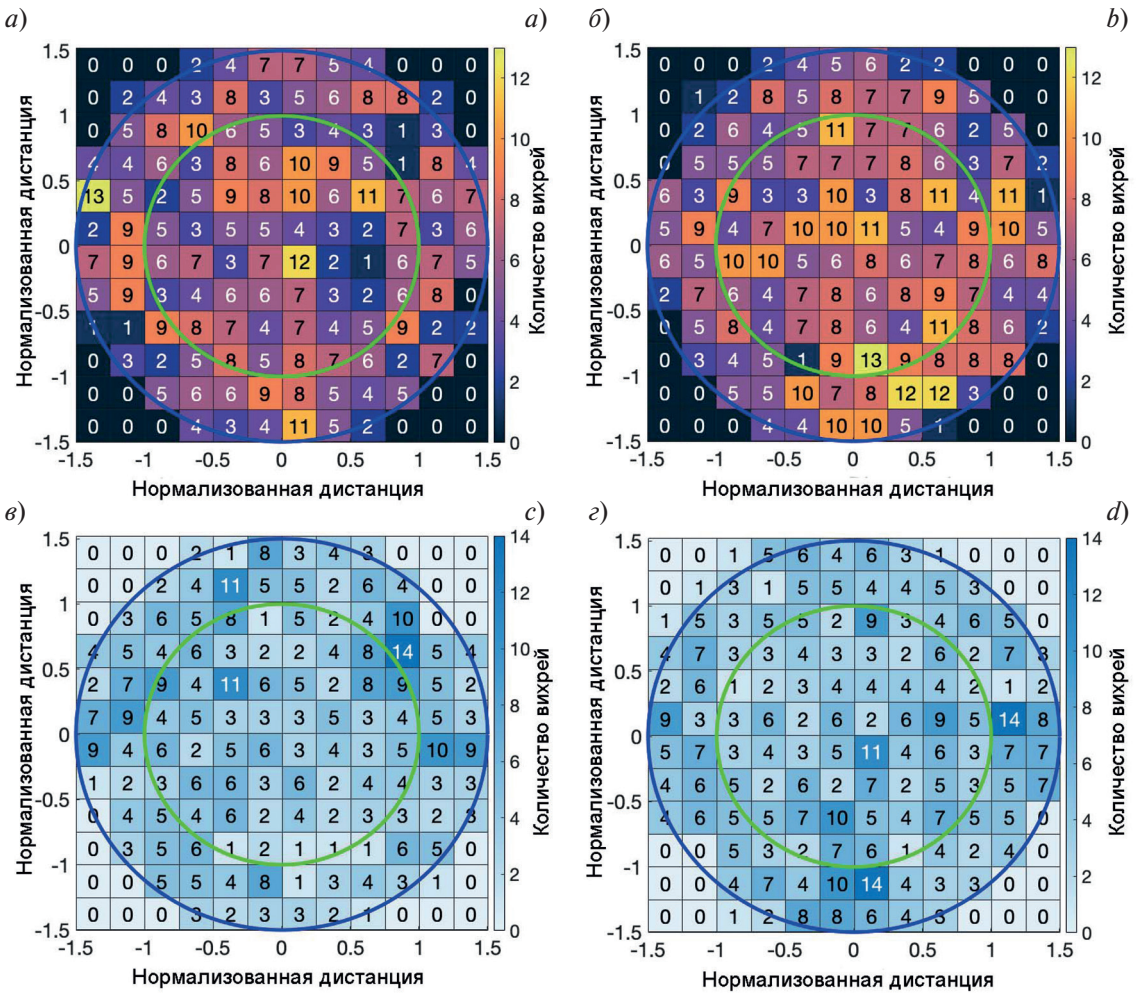

Рис. 2. Число профилей, рассчитанное в ячейках 0.25 R × 0.25 R (нормированная система координат) для антициклонических (*а*, *б*) и циклонических (*в*, *г*) вихрей, для летнего (слева) и зимнего (справа) периодов. Зеленая окружность соответствует радиусу композитного вихря в 1.0 R, синяя — в 1.5 R.

Fig. 2. Amount of the obtained profiles in the normalized eddy-coordinate system calculated in the 0.25 R × 0.25 R bin associated with the anticyclonic (*a*, *b*) and cyclonic (*c*, *d*) eddies. The left column refers to summer, and the right column refers to winter. The green and blue circles indicate distance of 1.0 R and 1.5 R from the eddy center, respectively.

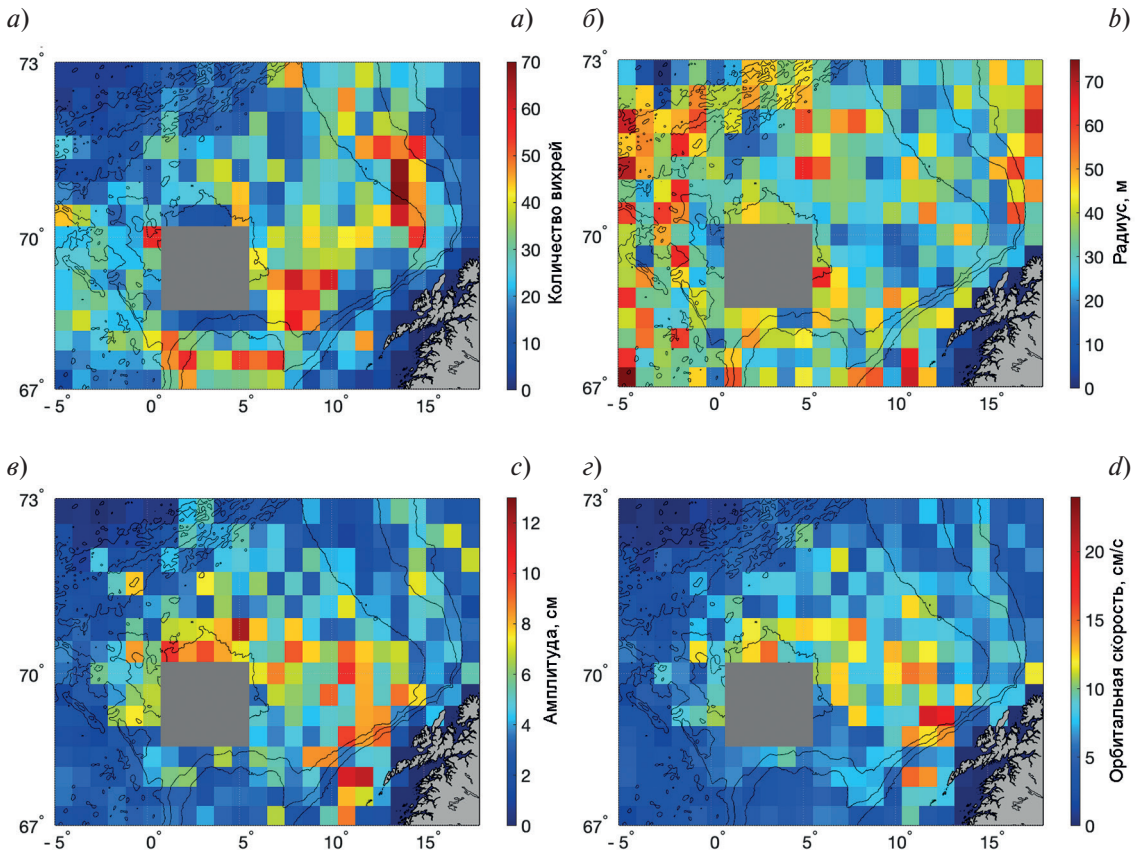

Рис. 3. Максимальные диапазоны сезонной изменчивости числа наблюденных вихрей (*а*), амплитуды (*б*), радиуса (*в*) и орбитальной скорости вихрей (*г*) в Лофотенской котловине, рассчитанные в ячейках 1 × 35° за период 1993—2017 гг. Серым цветом обозначена зона Лофотенского вихря (исключена из анализа).

Fig. 3. Maximum ranges of seasonal variability of the observed eddy amount (*a*), eddy amplitudes (*b*), eddy radii (*c*) and orbital eddy velocities (*d*) in the Lofoten Basin calculated in the 1 × 35° bin for 1993—2017. The grey color indicates the area of the Lofoten Basin (excluded from the analysis).

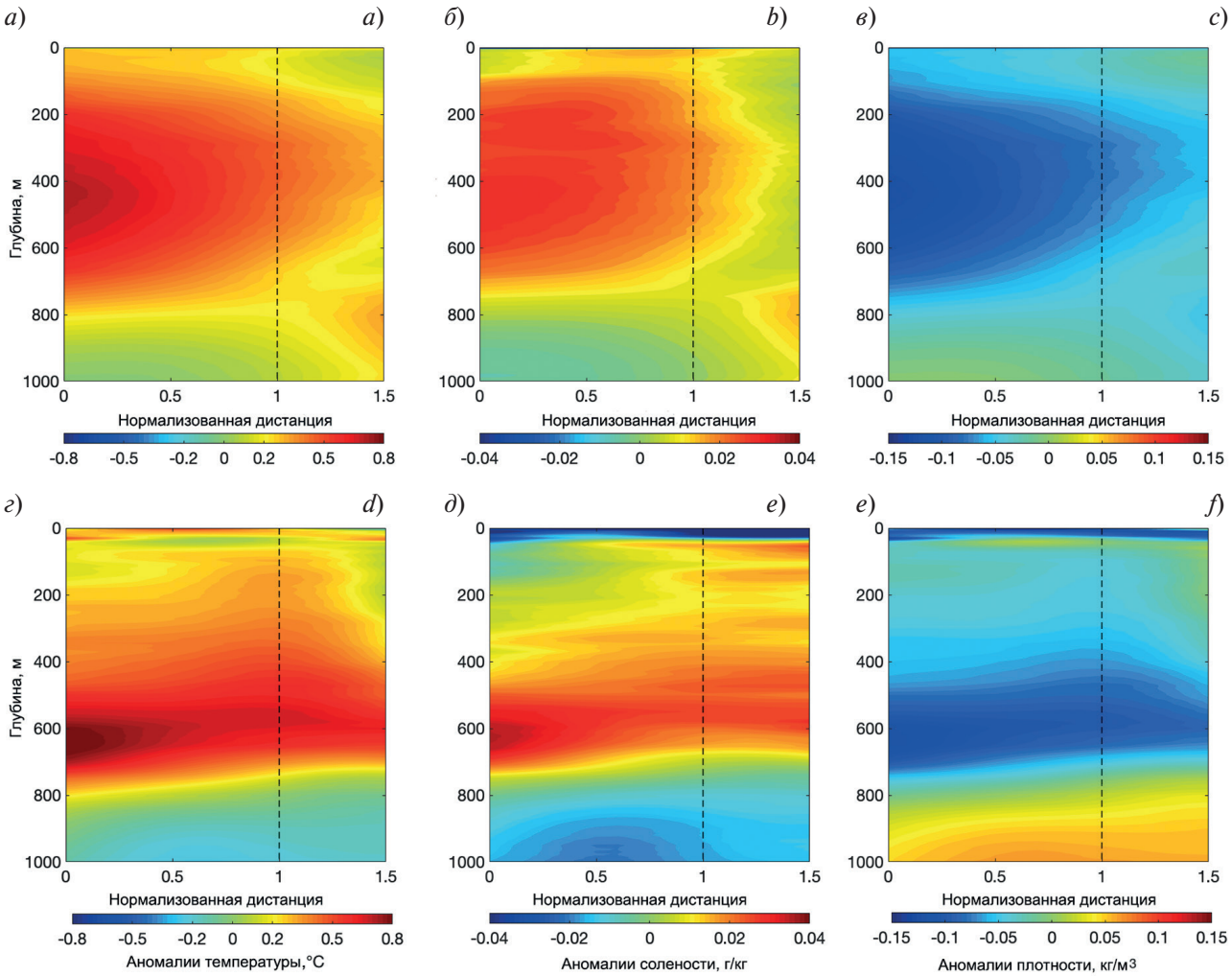

Рис. 7. Радиальные распределения аномалий температуры (*а*, *б*), солености (*в*, *г*) и плотности (*д*, *е*) в композитном антициклоне в зимний (*верхний ряд*) и летний период (*нижний ряд*).

Fig. 7. Radial cross-sections of temperature (*a*, *d*), salinity (*b*, *e*) and density (*c*, *f*) anomalies in the composite anticyclonic eddy for winter (*top*) and summer (*bottom*).

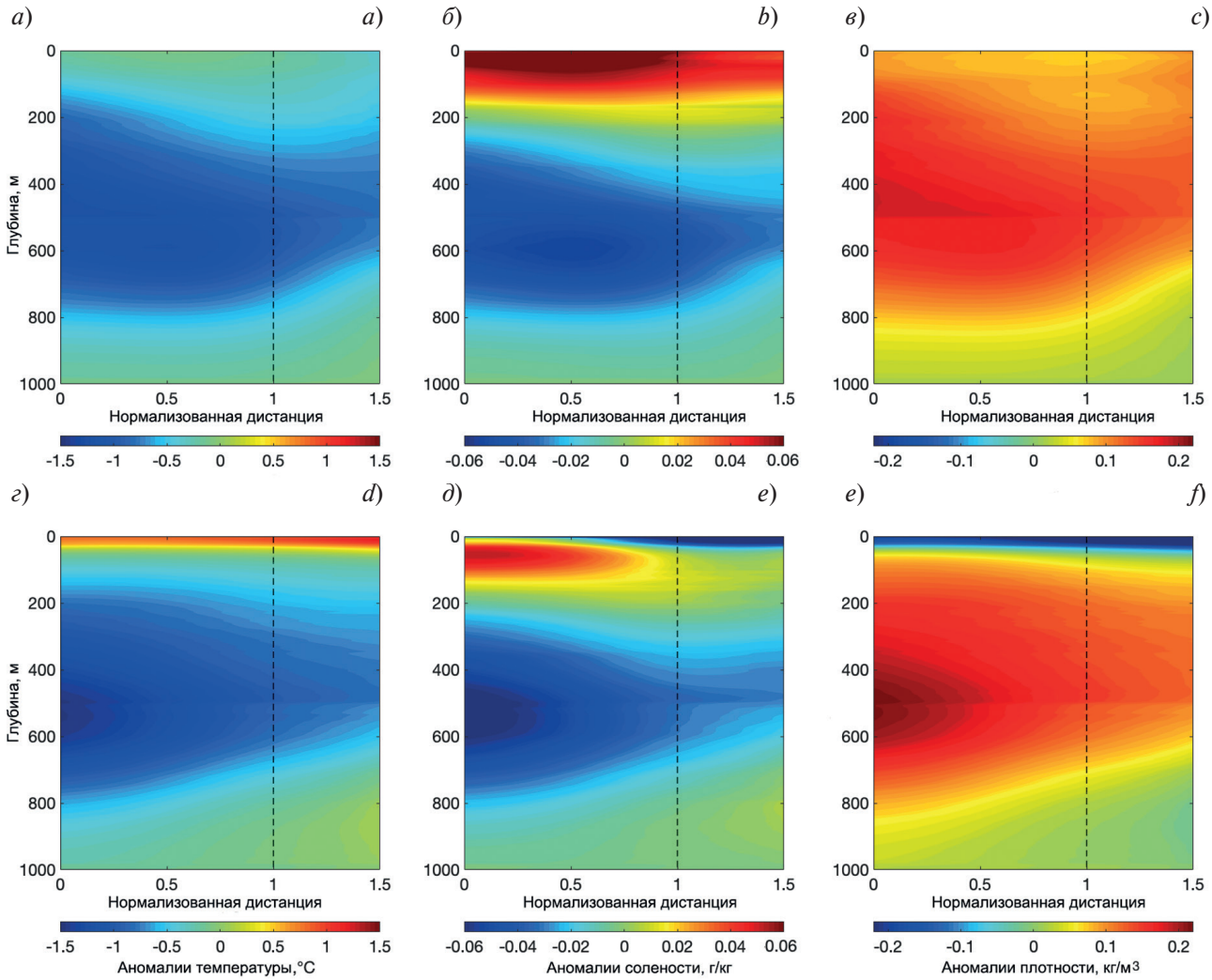

Рис. 8. Радиальные разрезы аномалий температуры (*а*, *б*), солености (*в*, *г*) и плотности (*д*, *е*) в композитном циклоне в зимний (*верхний ряд*) и летний (*нижний ряд*) период.

Fig. 8. Radial cross-sections of temperature (*a*, *d*), salinity (*b*, *e*) and density (*c*, *f*) anomalies in the composite cyclonic eddy for winter (*top*) and summer (*bottom*).

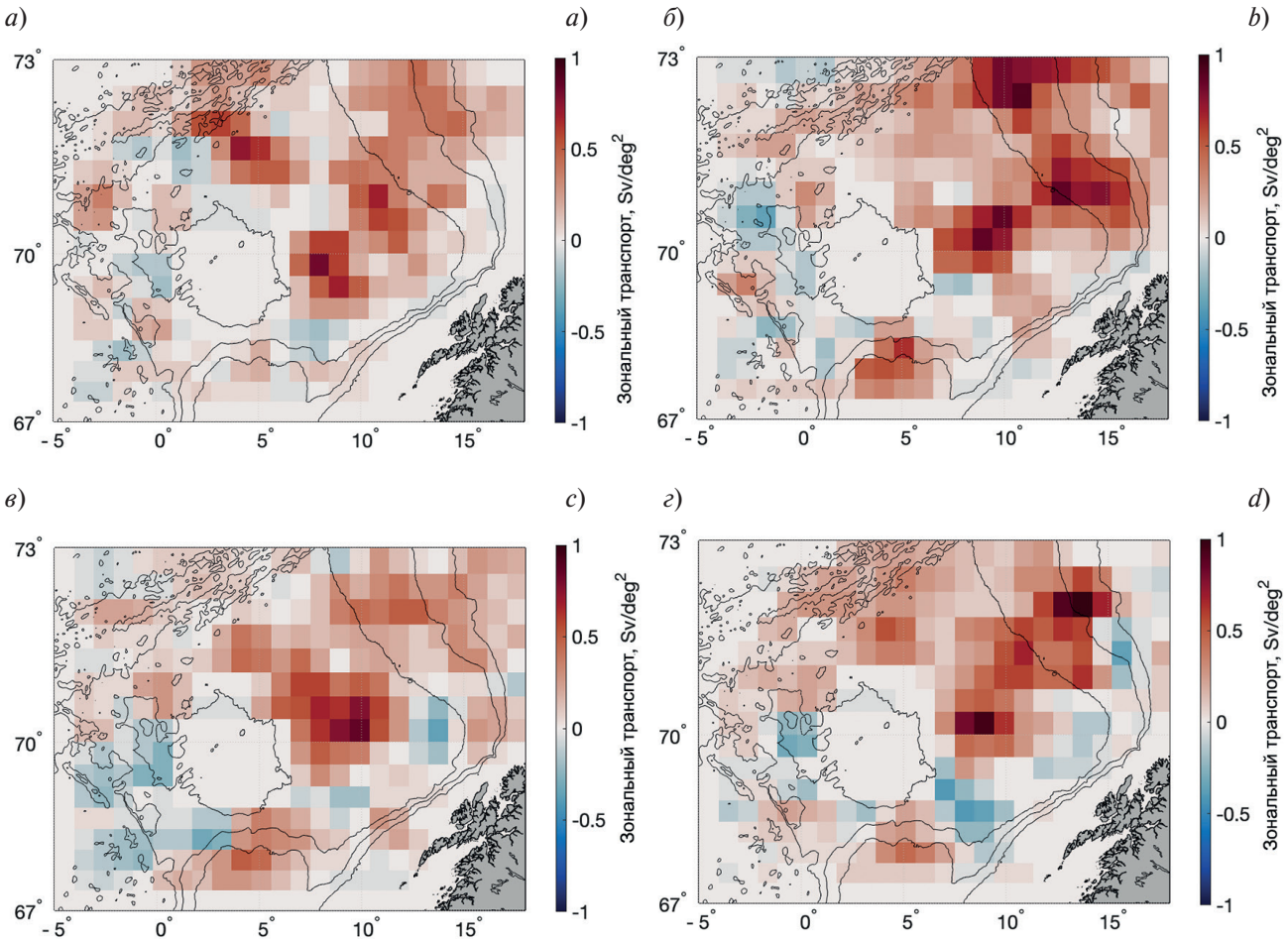

Рис. 9. Оценки зонального вихревого транспорта для антициклонов (*а*, *б*) и циклонов (*в*, *г*) для ячеек 1 × 35° (район квазипостоянного Лофотенского вихря исключен). Левая колонка — летний период, правая — зимний. Положительные значения соответствуют западному направлению транспорта, отрицательные — восточному. Осреднение за период 1993–2017 гг.

Fig. 9. Mean zonal eddy volume transport for the anticyclonic (*a*, *b*) and cyclonic (*c*, *d*) eddies estimated for every 1 × 0.35° bin in the Lofoten Basin for 1993–2017 (the area of the quasi-permanent Lofoten Vortex is excluded). The left column shows the summer period, and the right column shows the winter period. The positive values refer to the westward transport, and the negative values refer to the eastward transport.

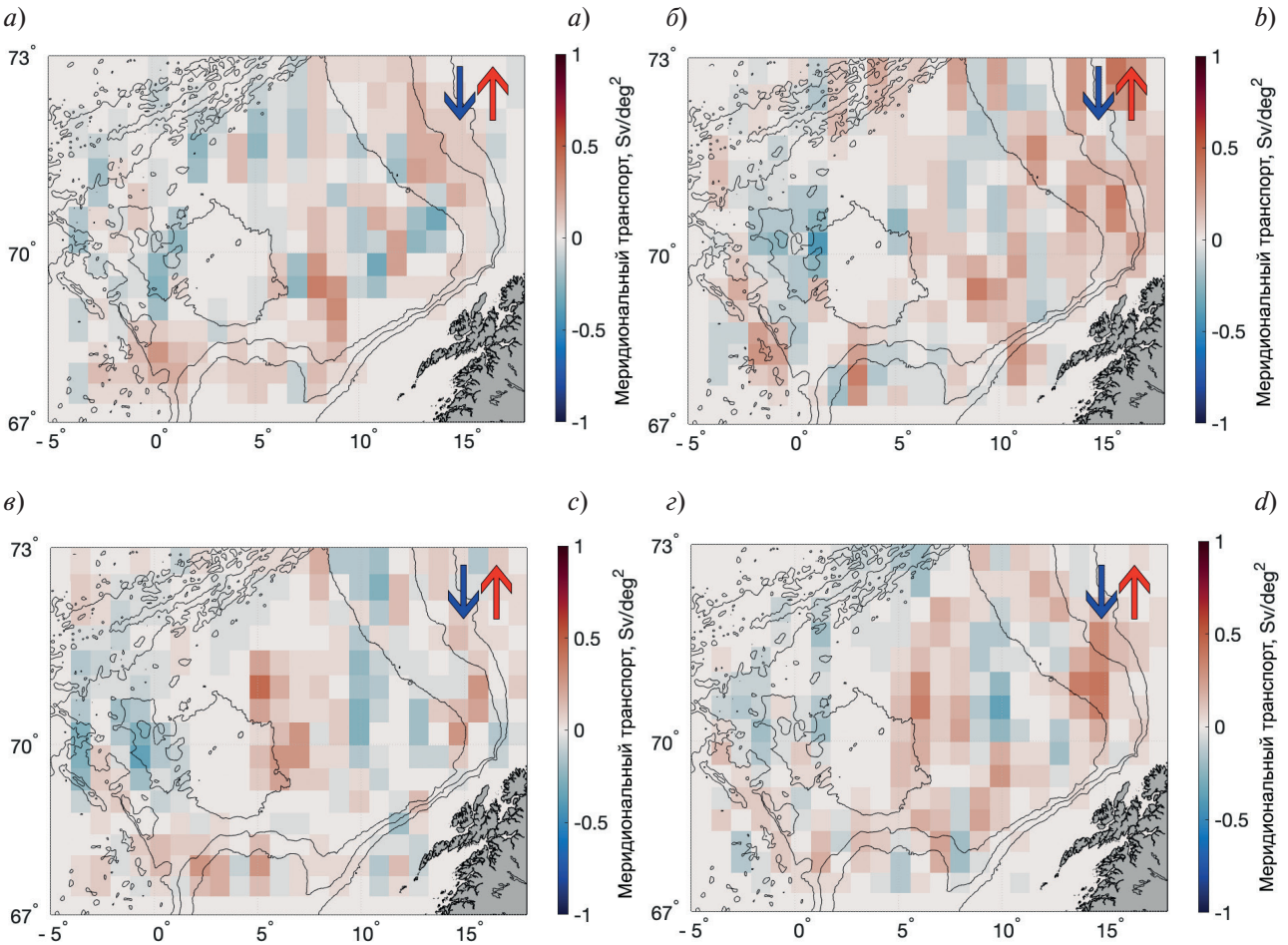

Рис. 10. Оценки меридионального вихревого транспорта для антициклонов (*a*, *b*) и циклонов (*c*, *d*) для ячеек 1 × 35° (район квазипостоянного Лофотенского вихря исключен). Левая колонка — летний период, правая — зимний. Положительные значения соответствуют западному направлению транспорта, отрицательные — восточному. Осреднение за период 1993–2017 гг.

Fig. 10. Mean meridional eddy volume transport for the anticyclonic (*a*, *b*) and cyclonic (*c*, *d*) eddies estimated for every 1 × 0.35° bin in the Lofoten Basin region for 1993–2017 (the area of the quasi-permanent Lofoten Vortex is excluded). The positive values refer to the northward transport, and the negative values refer to the southward transport.