


Сезонная и вертикальная изменчивость энергии течений в субмезомасштабном диапазоне на шельфе и в центральной части Черного моря

О. С. Пузина , А. А. Кубряков, А. И. Мизюк

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 oksana_puzina@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 04.06.2020 г., после доработки – 20.08.2020 г.

Цель. Цель данной работы – исследование сезонной изменчивости и вертикального распределения энергии субмезомасштабных течений (масштабы $L = 1 \dots 10$ км, $T = 1 \dots 10$ сут) в глубоководной и шельфовой зонах Черного моря.

Методы и результаты. Данные исследования проводятся на основе спектрального анализа результатов численных расчетов модели *NEMO* с высоким пространственным разрешением 1 км. Анализ показывает, что сезонная изменчивость энергии субмезомасштабных течений в исследуемых областях существенно различается. При этом сезонный ход энергии субмезомасштабных течений масштабом менее 10 км (E_{sp}) в обоих районах хорошо согласуется с сезонной изменчивостью флуктуаций плотности на тех же масштабах. В центральной части моря высокие значения E_{sp} в течение всего года сосредоточены в верхнем квазиоднородном слое. Пик E_{sp} наблюдается в зимний период на глубинах 0–40 м, что свидетельствует о важной роли бароклининой неустойчивости, вызванной неоднородностью распределения верхнего квазиоднородного слоя в этот период, в генерации субмезомасштабных процессов в Черном море. В то же время в центральной части северо-западного шельфа в феврале наблюдается абсолютный минимум E_{sp} , обусловленный полным перемешиванием и баротропизацией водной толщи. Максимальные значения E_{sp} отмечаются в сентябре – октябре, что связывается с интенсификацией кросс-шельфового переноса опресненных вод от устьев рек под влиянием синоптических вихрей. При этом в указанном районе, как и в центральной части моря, в осенний период высокие значения E_{sp} наблюдаются в слое большей толщины, чем в летний, совпадая с временным ходом толщины верхнего квазиоднородного слоя. Изменчивость энергии субмезомасштабных течений носит пульсационный характер с кратковременными интенсификациями и ослаблениями. Такая изменчивость значительно связана с прохождением синоптических фронтов и с кросс-шельфовым переносом вод под влиянием вихрей и апвеллингов, которые приводят к бароклининой неустойчивости вод.

Выводы. Сезонная и вертикальная изменчивость спектральной энергии в глубоководной и шельфовой зонах свидетельствует в пользу определяющей роли бароклининой неустойчивости вод, возникающей из-за неоднородности верхнего квазиоднородного слоя.

Ключевые слова: Черное море, спектральный анализ, субмезомасштабные течения, субмезомасштабные вихри, бароклининая неустойчивость, численное моделирование, *NEMO*

Благодарности: исследование сезонной изменчивости субмезомасштабных колебаний выполнено при поддержке гранта РФФИ 19-05-00479.

Для цитирования: Пузина О. С., Кубряков А. А., Мизюк А. И. Сезонная и вертикальная изменчивость энергии течений в субмезомасштабном диапазоне на шельфе и в центральной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 1. С. 41–56. doi:10.22449/0233-7584-2021-1-41-56

Seasonal and Vertical Variability of Currents Energy in the Sub-Mesoscale Range on the Black Sea Shelf and in its Central Part

O. S. Puzina ✉, A. A. Kubryakov, A. I. Mizyuk

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ oksana_puzina@mhi-ras.ru

Purpose. The study is aimed at investigating seasonal variability and vertical distribution of the sub-mesoscale currents energy (scales $L = 1 \dots 10$ km, $T = 1 \dots 10$ days) in the deep and shelf zones of the Black Sea.

Methods and Results. The study is based on the spectral analysis of the results obtained from the *NEMO* model numerical calculations performed with high spatial resolution 1 km. The analysis shows that in the areas under investigation, seasonal variability of the sub-mesoscale currents energy is significantly different. At that, in both regions, seasonal variation of energy of the sub-mesoscale currents whose scale is less than 10 km (E_{sp}) is in good agreement with that of the density fluctuations on the same scales. In the central part of the sea, the high values of (E_{sp}) are concentrated in the upper mixed layer throughout the whole year. The (E_{sp}) peak is observed in winter at the depths 0–40 m, which indicates the important role of baroclinic instability (induced by the inhomogeneous distribution of the upper mixed layer during this period) in generation of sub-mesoscale processes in the Black Sea. At the same time, in February in the central part of the northwestern shelf, an absolute minimum of (E_{sp}) is observed due to complete mixing and barotropization of the water column. The (E_{sp}) maximum values are noted in September – October, that is related to intensification of the desalinated water cross-shelf transport from the river mouths being affected by the synoptic eddies. At the same time, in the autumn period in this region, the (E_{sp}) high values are observed in the layer, the thickness of which is higher than that in summer (as well as in the central part of the sea). Dynamics of the (E_{sp}) values distribution corresponds to the time variation of the upper mixed layer thickness. Variability of the sub-mesoscale currents energy is of a pulsating character with the short-term intensifications and weakenings. Such variability is significantly related to passing of the synoptic fronts and the cross-shelf water transport being influenced by the eddies and upwellings, which lead to baroclinic instability of waters.

Conclusions. Seasonal and vertical variability of the spectral energy in the Black Sea deep and shelf zones testifies in favor of the decisive role of the water baroclinic instability arising due to heterogeneity of the upper mixed layer.

Keywords: Black Sea, spectral analysis, sub-mesoscale currents, sub-mesoscale eddies, baroclinic instability, numerical modeling, *NEMO*

Acknowledgments: Seasonal variability of the sub-mesoscale fluctuations was studied at support of the RFBR grant No. 19-05-00479.

For citation: Puzina, O.S., Kubryakov, A.A. and Mizyuk, A.I., 2021. Seasonal and Vertical Variability of Currents Energy in the Sub-Mesoscale Range on the Black Sea Shelf and in its Central Part. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(1), pp. 37-51. doi:10.22449/1573-160X-2021-1-37-51

1. Введение

Субмезомасштабные течения на масштабах $L = 1 \dots 10$ км, $T = 1 \dots 10$ сут¹ – промежуточное звено между синоптическими и мелкомасштабными течениями – играют важнейшую роль в каскаде и диссипации энергии океана [1]. Субмезомасштабная динамика оказывает значительное влияние на вертикальный обмен и стратификацию океана [2–5]. В прибрежной зоне субмезо-

¹ Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С. Синоптические вихри в океане. Л. : Гидрометеоздат, 1982. 264 с.

масштабная динамика значительным образом определяет и горизонтальный обмен, способствуя кросс-шельфовому переносу органической и неорганической взвеси [6–9], смещению вод, например на фронтах речных плумов или на границе апвеллингов [10–11].

Основной объем информации о субмезомасштабных вихрях Черного моря был получен по спутниковым оптическим и радиолокационным данным. В работах [12–14] описываются геометрические характеристики таких вихрей, статистика их наблюдений в некоторых районах моря, их связь с особенностями топографии. В работе [15] на основе контактных измерений показано, что скорости в субмезомасштабных вихрях радиусом 3–5 км могут достигать значений 0,25–0,5 м/с, что свидетельствует о высоких числах Россби в этих образованиях. Описание механизмов генерации субмезомасштабных вихрей и их анализ при помощи спутниковых данных и лабораторного моделирования в Черном море приведены в работе [16]. Авторы этой работы демонстрируют, что важным механизмом образования вихрей является баротропная неустойчивость течения, вызванная сдвигом скорости на фронтах синоптических антициклонов при взаимодействии с топографическими особенностями, интенсивном воздействии ветра.

Развитие методов численного моделирования позволило детально исследовать механизмы генерации субмезомасштабных течений и особенности их пространственно-временной изменчивости в различных районах океана [17, 18]. Данные моделей в работах [10, 18–19] позволили на основе спектрального анализа получить информацию о сезонной изменчивости субмезомасштабных течений. В частности, такие исследования показали, что сезонный максимум энергии течений на малых пространственных масштабах в глубоководной части Атлантического океана отмечается в зимний период [19]. Образование субмезомасштабных вихрей в это время наблюдается на нижней границе верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и связывается с горизонтальными градиентами плотности, возникающими из-за неоднородности его толщины [3, 17, 20–21].

В Черном море исследованиям субмезомасштабной динамики по данным численного моделирования посвящено крайне ограниченное число работ. В работах [22–24] демонстрируются возможности модели воспроизводить субмезомасштабные вихри в различных частях бассейна. Анализ энергетики синоптических и субмезомасштабных вихрей в работе [22] показал важную роль сил плавучести в образовании этих динамических структур.

В настоящей работе на основе спектрального анализа модуля скорости по расчетам модели *NEMO* с высоким разрешением (1 км) впервые исследуется сезонная изменчивость и вертикальное распределение энергии субмезомасштабных течений (E_{sp}) в Черном море. Кроме того, проводится сравнительный анализ этих характеристик в открытой и шельфовой частях моря, что позволяет выявить существенные различия в механизмах формирования субмезомасштабной динамики вод в рассматриваемых районах бассейна.

2. Данные и методы

В работе используется региональная конфигурация модельного комплекса *NEMO* [25] с высоким пространственным разрешением, позволяющая вос-

производить мезо- и субмезомасштабную изменчивость гидрофизических полей в бассейне Черного моря [26]. Расчетный домен представляет собой квазирегулярную сетку, покрывающую каскад бассейнов Мраморного, Черного и Азовского морей с шагами $1/96^\circ$ по широте и $1/69^\circ$ по долготе. Это соответствует приблизительно 1,157 км в меридиональном направлении. Вдоль параллели шаг меняется равномерно от 1100 м на севере до 1230 м на юге. Топография дна построена с использованием батиметрических данных с портала *EMODnet* (URL: <http://www.emodnet-bathymetry.eu>). Для получения адекватных значений расхода через пролив Босфор был использован прием «полузакрытая ячейка» [25] для достижения поперечного размера в проливе 1000 м. Расчет проводился для периода 2008–2009 гг.

Гидродинамический блок модели основан на системе примитивных уравнений [25]. Для нелинейных слагаемых в уравнениях переноса – диффузии тепла и соли используется схема *TVD* [27]. Дискретизация по времени осуществляется посредством модифицированной схемы «чехарда» [27]. По вертикали используется z -координата с дробным шагом.

Параметризация вертикального турбулентного перемешивания выполнена посредством модели $k - \epsilon$ [28]. Обмен по горизонтали описывается бигармоническим оператором с коэффициентами вязкости ($-4 \cdot 10^7 \text{ м}^4/\text{с}$) и диффузии тепла и соли ($-8 \cdot 10^6 \text{ м}^4/\text{с}$). В качестве уравнения состояния используется формула ЮНЕСКО. Для расчета уровня моря используется схема расщепления по времени, то есть на каждом шаге так называемой медленной моды (1 мин) осуществляется численное интегрирование осредненных по вертикали уравнений движения с шагом «быстрой» моды (4 с).

При численном интегрировании системы уравнений на твердых боковых границах для тангенциальной компоненты скорости в уравнениях движения ставятся условия скольжения и равенства нулю нормальной компоненты скорости. На дне задается нелинейное трение для горизонтальных компонент скорости и равенство нулю вертикальной компоненты скорости. В уравнениях переноса – диффузии тепла (соли) на боковых границах и дне ставится условие отсутствия потоков.

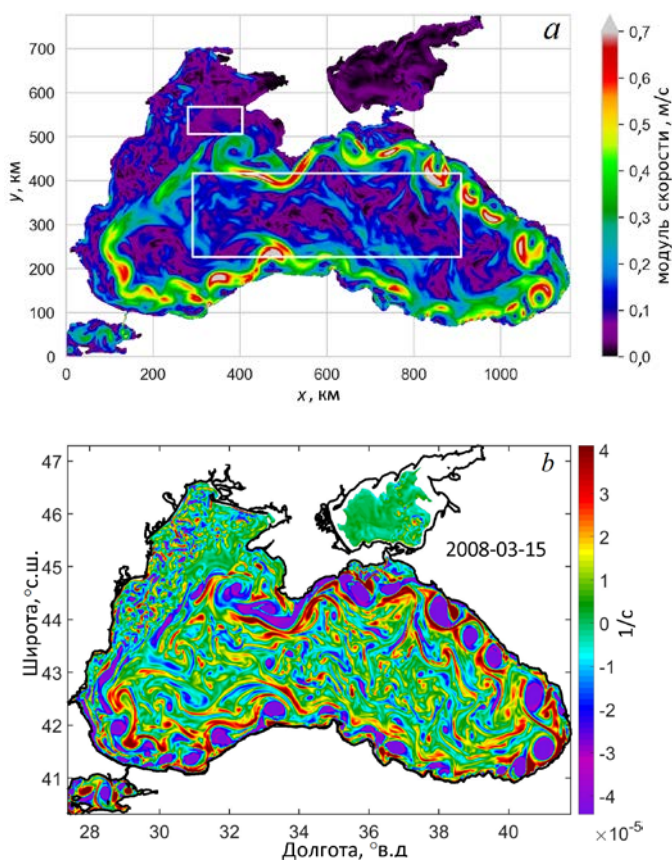
Для граничных условий на поверхности в настоящей работе используются поля температуры и влажности воздуха на уровне 2 м, горизонтальной компоненты скорости ветра на уровне 10 м, потоки нисходящего длинноволнового и коротковолнового излучения, осадки в жидкой и твердой фазах из глобального атмосферного реанализа последнего поколения *ERA5*². Этот продукт имеет пространственное разрешение $1/4^\circ$. Временное разрешение составляет 1 ч.

В качестве начальных условий для Черного моря использовались поля температуры и солёности, предоставленные Центром морских прогнозов Черного моря (URL: <http://mis.bsmfc.net:8080/thredds/catalog.html>). Начальные условия для Азовского моря были подготовлены с использованием объективного анализа натуральных наблюдений, предоставленных *CMEMS* и океанографической

² ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate [Electronic resource] // Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS): site. 2017. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> (date of access: 25.01.2021).

базой данных проекта *SeaDataNet* (URL: <https://www.seadatanet.org/>). Для Мраморного моря начальные условия взяты из глобального реанализа службы *CMEMS*. Более подробное описание эксперимента представлено в работе [26].

Пример рассчитанных по модели карт завихренности и скорости течений представлен на рис. 1. На этих картах отчетливо видны динамические структуры различного масштаба: многочисленные субмезомасштабные вихри в центре моря, большое количество мелких вихрей на северо-западном шельфе (СЗШ) бассейна, а также более крупные антициклоны справа от Основного Черноморского Течения (ОЧТ) в районе континентального склона бассейна. Для анализа в настоящей работе были выбраны области в глубоководной части (42,5–44° с. ш., 31–38,8° в. д.) и в центре СЗШ (44,75–45,8° с. ш., 31–32,5° в. д.). Области выбирались таким образом, чтобы дно в них было практически однородно.



Р и с. 1. Пример поля модуля скорости (*a*) и завихренности (*b*) течений на поверхности за 15 марта 2008 г. Прямоугольниками выделены анализируемые области: большим – центральная часть моря; малым – шельфовая область

F i g. 1. Example of the field of the currents velocity (*a*) and vorticity (*b*) module on the surface on March 15, 2008. The rectangles show the areas under study: large rectangle – the sea central part; small one – the shelf area

На основе проведенных расчетов в выбранных областях с помощью аппарата спектрального анализа определялись двумерные пространственные

спектры энергии течений $E(k_x, k_y)$, где k_x и k_y – волновые числа. На основе рассчитанных характеристик определялся изотропный одномерный спектр $E(k)$, где $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$.

3. Результаты

3.1. Спектральные характеристики изменчивости скорости течений в Черном море

Пространственные спектры скорости течения и плотности в выбранных областях представлены на рис. 2. Энергия колебаний в центральной части моря в среднем выше, чем в шельфовой. Исключение составляет ограниченная область малых масштабов (3–5 км), где наблюдается достаточно выраженный пик энергии течений, который позволяет говорить об усилении субмезомасштабных процессов на СЗШ. Сходный вид – с выраженным пиком на масштабах 3–5 км – имеет спектр плотности (рис. 2, *b*), что свидетельствует о бароклинной природе наблюдаемых колебаний скорости. Значения энергии колебаний плотности в центральной и шельфовых областях на больших масштабах сопоставимы, в отличие от значений энергии колебаний скорости течений в этих областях.

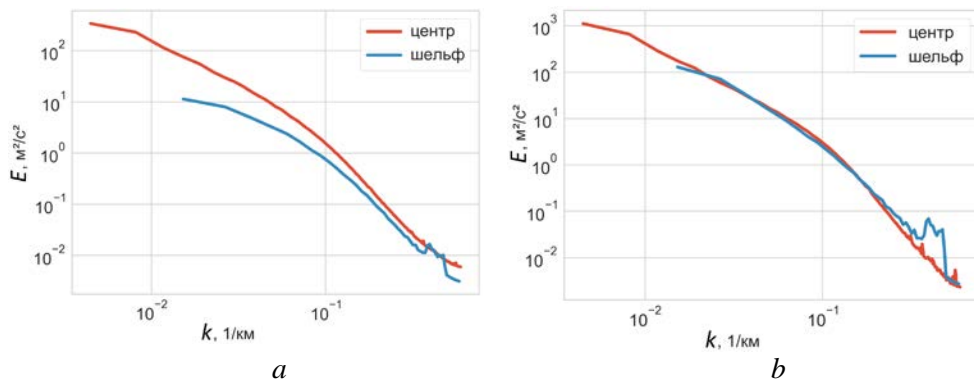
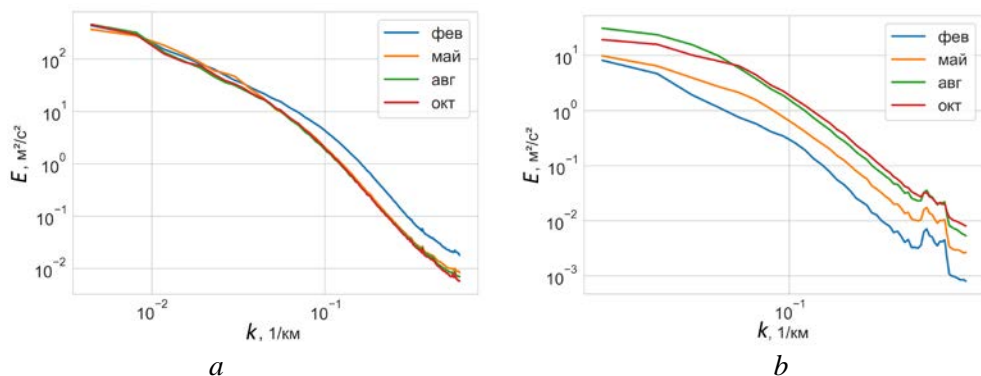


Рис. 2. Средний пространственный спектр: *a* – скорости; *b* – плотности в центральной (красная линия) и в шельфовой (синяя линия) частях Черного моря на глубине 6,5 м

Fig. 2. Mean spatial spectrum of: *a* – velocity, *b* – density at the 6.5 m depth in the central (red line) and shelf (blue line) parts of the Black Sea

Анализ пространственных спектров в различных сезонах показал, что в центральной части вид спектров скорости в течение всего года почти одинаков, за исключением зимних месяцев (рис. 3, *a*). В зимний период энергия на малых пространственных масштабах ($L < 20$ км) значительно возрастает – в 2–3 раза по сравнению с другими сезонами. Для шельфовой части сезонные различия более выражены (рис. 3, *b*). При этом здесь, в отличие от центральной части, в зимний период отмечается снижение энергии на всех масштабах, а ее максимум наблюдается в позднелетний и осенний периоды. В это время энергия течений превышает зимнюю более чем на порядок. Отметим, что в летний период (зеленая линия) энергия максимальна в области больших масштабов, что может быть связано с интенсификацией синоптиче-

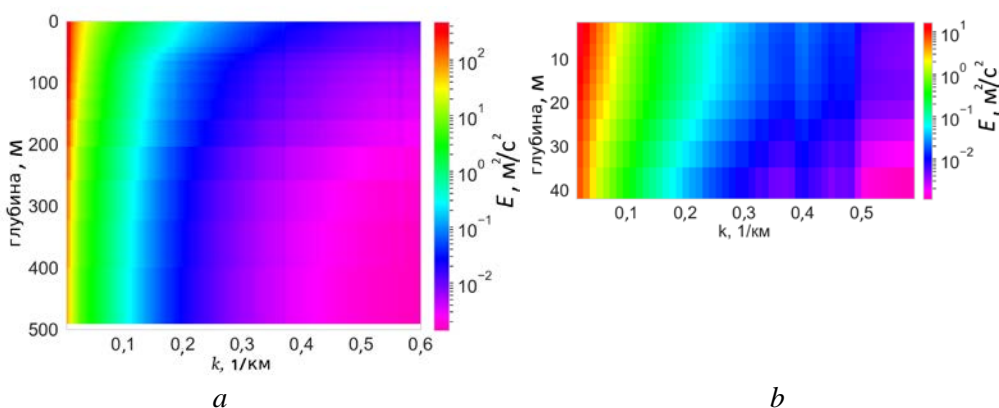
ской вихревой динамики летом в Черном море [29, 30]. В то же время на меньших масштабах ($L < 15$ км) энергия максимальна в осенний период.



Р и с. 3. Пространственные спектры скорости течений на глубине 6,5 м в центральной (а) и шельфовой (b) частях Черного моря для различных сезонов

F i g. 3. Spatial spectra of the current velocities at the 6.5 m depth in the central (a) and shelf (b) parts of the Black Sea for different seasons

Основной особенностью вертикального распределения спектральной энергии для обеих выбранных областей является ее уменьшение с глубиной (рис. 4). В области волновых чисел $k > 0,1$ или $L < 10$ км, что соответствует определению субмезомасштабов в данной работе, энергия максимальна в верхнем деятельном слое (0–50 м) в центре моря (рис. 4, a). Ниже деятельного слоя энергия падает более чем на порядок в слое 50–200 м и более чем на два порядка в нижележащих слоях. Для шельфовой области также заметно увеличение в верхнем слое (0–25 м) и постепенное уменьшение в придонных слоях (рис. 4, b).



Р и с. 4. Вертикальная диаграмма $E, \text{m}^2/\text{с}^2$, осредненная за весь расчетный период в центре (а) и на шельфе (b) Черного моря

F i g. 4. Vertical diagram $E, \text{m}^2/\text{s}^2$, averaged for the whole calculation period in the central (a) and shelf (b) parts of the Black Sea

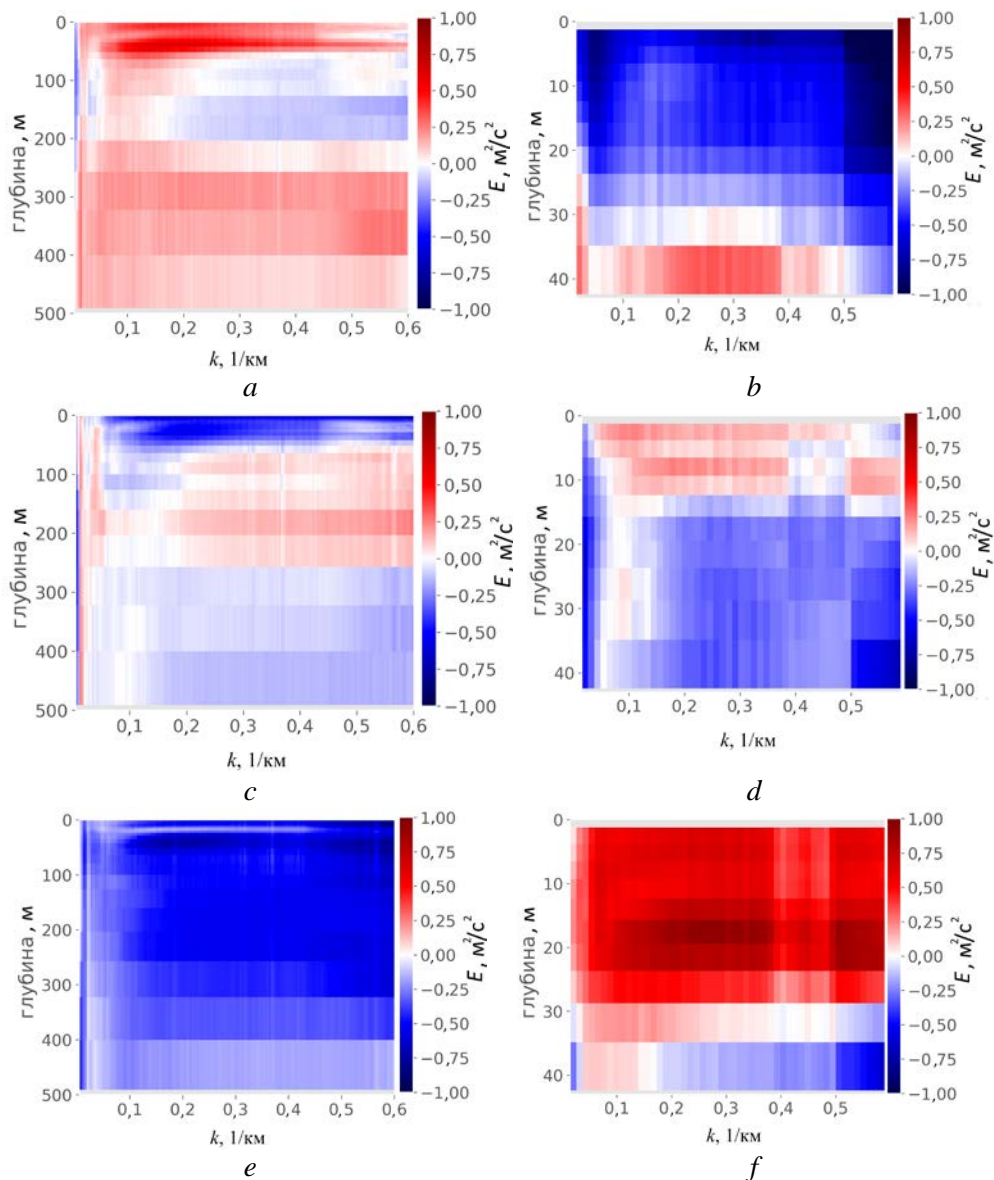


Рис. 5. Разница R логарифма спектральной энергии за январь (а), июнь (с), октябрь (е) в центральной части Черного моря; за январь (b), июнь (d), октябрь (f) в шельфовой части моря и логарифма средней энергии за все время

Fig. 5. Difference R of the spectral energy logarithm for January (a), June (c) and October (e) in the Black Sea central part; for January (b), June (d) and October (f) in the sea shelf part, and that of the average energy logarithm for the whole period

Для иллюстрации сезонных изменений распределения спектров энергии по глубине на рис. 4 представлены диаграммы аномалии логарифма энергии, рассчитанные как $R = \langle \log(E) - \log(\langle E \rangle) \rangle$, где $\langle E \rangle$ – осредненная за весь расчетный период спектральная энергия. В январе в центральной части Черного моря на субмезомасштабах ($k > 0,1$ 1/км) отмечаются положительные значения R в верхнем слое 0–60 м и в глубинных слоях ниже уров-

ня/горизонта 200 м. Максимальное увеличение энергии отмечается в слое 30–60 м, который соответствует нижней границе ВКС, а также в поверхностном слое. В то же время в слое 80–200 м значения R отрицательны для наименьших масштабов ($L \leq 5$ км), т. е. здесь происходит ослабление субмезомасштабной динамики. В июне (рис. 5, *b*) картина противоположна: в слое 0–40 м энергия субмезомасштабных процессов ослабевает, на глубинах 50–250 м возрастает. На синоптических масштабах также происходит рост энергии вплоть до глубин 300–400 м. В октябре (рис. 5, *c*) узкая область положительных значений R и усиление энергии отмечаются в нижней части сезонного термоклина на глубинах 20–30 м. В то же время ниже термоклина энергия уменьшается. В глубинных слоях в этот период энергия больше, чем зимой, но меньше, чем летом.

В шельфовой области распределение R существенно отличается. Зимой в верхнем слое отмечается значительное уменьшение энергии как на больших, так и на самых малых масштабах (рис. 5, *b*). В то же время энергия течений возрастает в нижнем придонном слое (30–40 м). В летний период наблюдается обратная ситуация – энергия колебания возрастает в верхнем квазиоднородном слое и слое скачка (0–15 м), уменьшается в придонной части для диапазона $L < 10$ км и $L > 20$ км, а на масштабах радиуса Россби (10–20 км) остается постоянной или незначительно растет (рис. 5, *d*). В осенний период максимум энергии заглубляется вместе с ВКС до глубин 10–25 м (рис. 5, *e*). Значительный рост энергии отмечается во всем сезонном термоклине – слое 0–25 м. В нижележащих слоях в осенний сезон, как и летом, энергия значительно ниже, чем в январе.

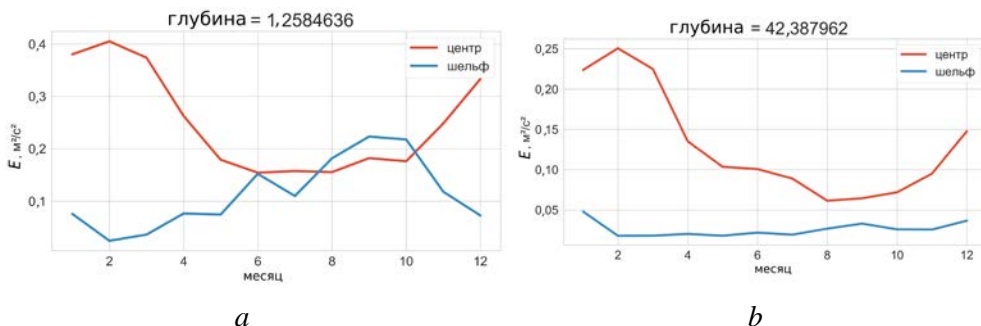
3.2. Сезонная и вертикальная изменчивость энергии субмезомасштабных течений в Черном море

Представленные диаграммы свидетельствуют о значимой сезонной и вертикальной изменчивости интенсивности субмезомасштабных течений в Черном море. Для исследования этой изменчивости полученные спектры были усреднены для диапазона длин волн $L = 1 \dots 10$ км: $E_{sp} = E(L < 10 \text{ км})$.

Отметим, что для центральной части моря значение $L = 10$ км меньше радиуса деформации Россби Rd , равного 25 км [31]. В то же время в мелководных шельфовых районах бароклинный радиус Россби может быть несколько ниже выбранного предельного значения 10 км. Однако, как видно из рис. 5, картины сезонной изменчивости спектральной энергии в диапазоне $L = 2 \dots 10$ км сходны, что свидетельствует о приемлемости выбора данного критерия для анализа субмезомасштабной изменчивости на шельфе.

Сезонная изменчивость E_{sp} на верхнем горизонте модели $z = 1,2$ м и на глубине 40 м показана на рис. 6, *a*. Отметим ярко выраженные различия в сезонном ходе субмезомасштабных процессов на шельфе и в центре бассейна. Субмезомасштабные течения интенсифицируются зимой в центре моря и поздним летом – осенью на периферии бассейна. При этом на поверхности значения E_{sp} в зимний период значительно выше (в четыре раза) в центре моря, чем на шельфе, и сопоставимы со значениями на шельфе в летний период. В то же время на глубине 40 м значения E_{sp} в центре моря на порядок выше

(рис. 6, *b*), чем в придонных слоях шельфа, что, по-видимому, связано с затуханием скорости в модели при трении о дно.



Р и с. 6. Сезонная изменчивость энергии субмезомасштабных процессов ($L < 10$ км) в центре (красная линия) и на шельфе (синяя линия) Черного моря на верхнем горизонте $z = 1$ м (*a*) и в области холодного промежуточного слоя на глубине $z = 43$ м (*b*)

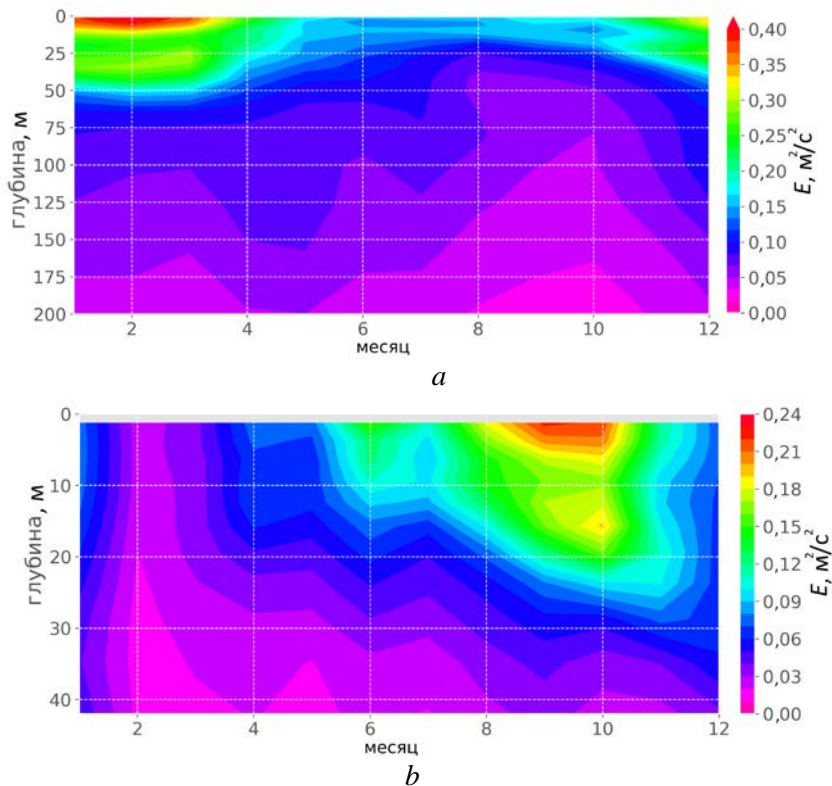
Fig. 6. Seasonal variability of the sub-mesoscale processes energy ($L < 10$ km) in the central (red line) and shelf (blue line) parts of the Black Sea on the upper horizon $z = 1$ m (*a*) and in the cold intermediate layer area on depth $z = 43$ m (*b*)

Максимум E_{sp} в центре моря отмечается в зимний период, в январе – марте. Как показывает вертикальная диаграмма на рис. 7, *a*, в это время наибольшая интенсивность субмезомасштабных процессов наблюдается во всем ВКС. Такое распределение говорит о том, что неустойчивость течений, возникающая вследствие меняющейся глубины расположения ВКС, является важной причиной образования субмезомасштабных вихрей в Черном море, что согласуется с данными из работ [20, 32].

E_{sp} во все сезоны максимальна в верхнем перемешанном слое, толщина которого меняется от 5–10 м в летний период до 0–5 м в зимний [33, 34]. Эта зависимость наблюдается и на межгодовых масштабах. Так, в холодном 2008 г., когда ВКС был глубже, E_{sp} проникало на большие глубины (50–60 м) (рис. 9, *a*), чем в более теплом 2009 г. На графике также видно, что изменчивость E_{sp} характеризуется значительными короткопериодными колебаниями. В определенный момент происходит резкое усиление энергии во всем перемешанном слое. Возможной причиной таких всплесков является резкое изменение глубины ВКС, связанное с резким выхолаживанием или штормовым воздействием. Проведенный нами более детальный анализ показал, что в центре моря в летний период усиление субмезомасштабной динамики также связано с развитием Анатолийского апвеллинга и бароклинной неустойчивостью на его фронте, а также проникновениями синоптических вихрей в центральную часть моря. Более подробное исследование короткопериодной изменчивости E_{sp} и ее причин планируется нами в дальнейших работах.

Минимум E_{sp} в центре моря отмечается летом – осенью на поверхности и в осенний период (август – сентябрь) на глубине 40 м. В это время в Черном море наблюдается пик развития более крупных синоптических вихрей [30]. Несмотря на то что на периферии этих вихрей, особенно антициклонов, часто образуются малые субмезомасштабные циклоны [34], при возникновении неустойчивости на нижней границе ВКС количество синоптических вих-

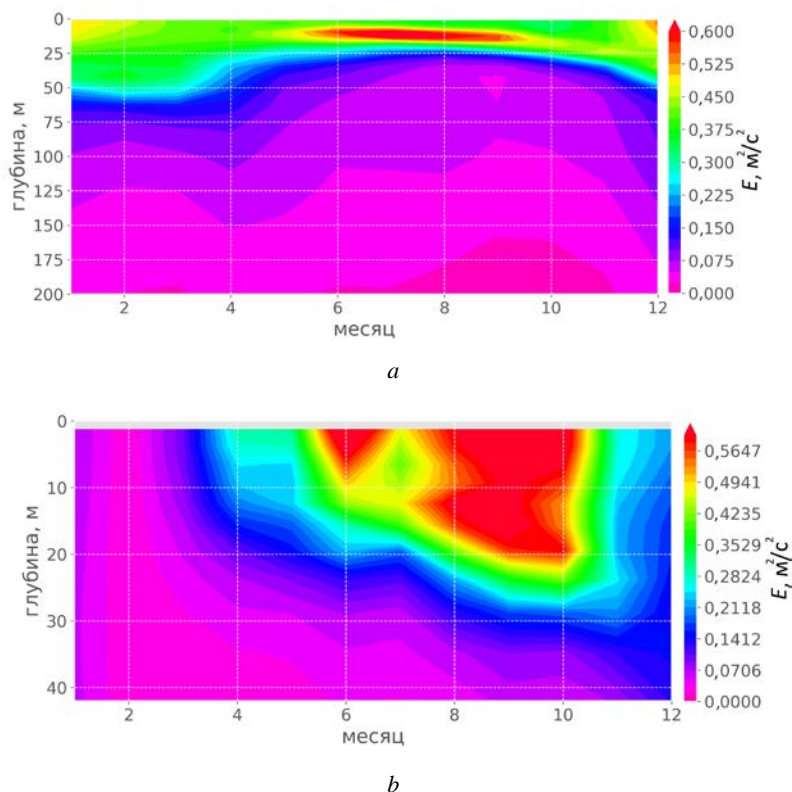
рей намного меньше, чем в зимний период. Таким образом, в центральной части Черного моря энергия субмезомасштабных и синоптических течений находится в противофазе: зимой интенсифицируются субмезомасштабные вихри, летом – синоптические.



Р и с. 7. Сезонная изменчивость энергии субмезомасштабных течений по модулю скорости ($L < 10$ км) в центре (a) и на шельфе (b) Черного моря

F i g. 7. Seasonal variability of the sub-mesoscale currents energy by the velocity module ($L < 10$ km) in the central (a) and shelf (b) parts of the Black Sea

Предположение о важности бароклинной неустойчивости подтверждается рассчитанной спектральной изменчивостью плотности на субмезомасштабах для исследуемых районов Черного моря (рис. 8). Диаграммы сезонного хода вертикального распределения субмезомасштабной изменчивости плотности и скорости сходны (рис. 7). В зимний период максимум колебаний плотности заглубляется до 50 м в центре моря, в летний – до 30 м, что соответствует положению сезонного термоклина. Усиление субмезомасштабной энергии скорости течений на нижней границе сезонного термоклина (20–30 м) также наблюдается летом по данным, представленным на рис. 7, a. Однако эти увеличенные значения намного ниже зимних. Усиление циркуляции, ветрового воздействия, а также интенсивные потоки плавучести в зимний период, вероятно, являются важной причиной увеличения субмезомасштабной энергии течений в зимний период по сравнению с летним.



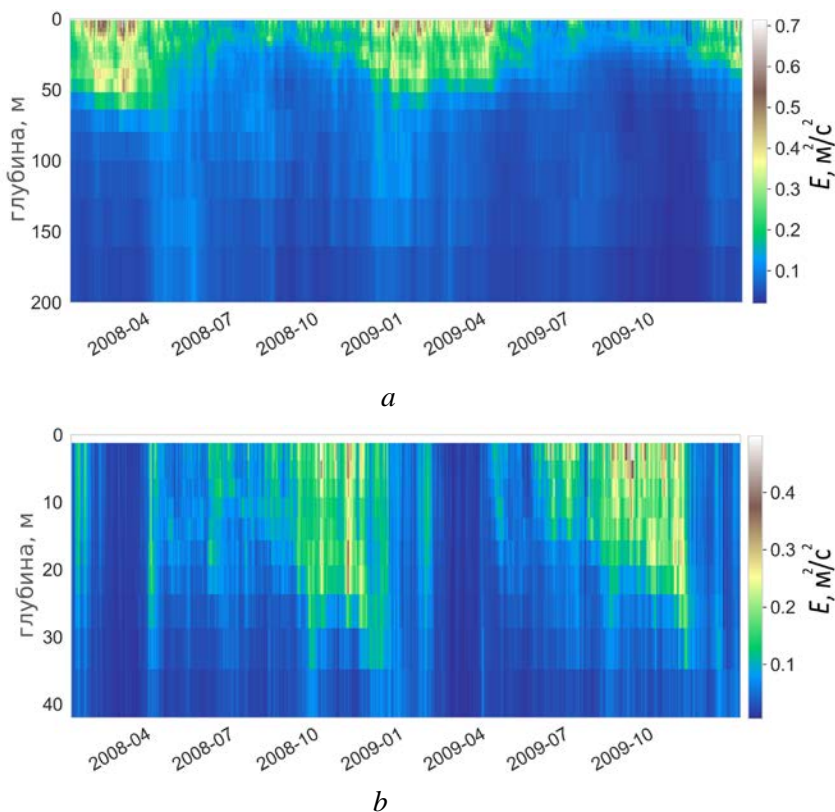
Р и с. 8. Сезонная изменчивость спектральной энергии субмезомасштабных течений по плотности ($L < 10$ км) в центре (a), на шельфе (b) Черного моря

F i g. 8. Seasonal variability of the sub-mesoscale currents spectral energy by density ($L < 10$ km) in the central (a) and shelf (b) parts of the Black Sea

Напротив, в центральной части шельфовой зоны резкий минимум E_{sp} наблюдается в феврале. В это время на шельфе столб воды перемешан до дна. Из-за отсутствия градиентов плотности бароклинные течения на шельфе отсутствуют, что приводит к минимуму E_{sp} во всей толще вод. Такая изменчивость свидетельствует о важной роли бароклинных движений и малой энергии баротропных течений на таких пространственных масштабах.

Этот вывод подтверждает и аналогичная диаграмма флуктуации плотности, представленная на рис 8, b. Значительный рост E_{sp} на шельфе отмечается в августе на поверхности, а к сентябрю – октябрю E_{sp} достигает пика и ее максимальные значения прослеживаются до наибольших глубин (рис. 6, b; 7, b). Анализ численных результатов показал, что вероятной причиной такого усиления является адвекция опресненных реками вод в центр СЗШ под действием интенсифицирующихся в летний период синоптических вихрей [35]. Увеличение потенциальной энергии вод, а также горизонтальная неоднородность распределения солёности вызывает интенсивную генерацию бароклинных субмезомасштабных вихрей. Дополнительный эффект дает и баротропная неустойчивость, вызванная сдвигом скорости на периферии антициклонов [15, 16]. Определенный вклад осенью может давать и бароклинная неустой-

чивость вод на нижней границе увеличивающегося ВКС. Однако в декабре – январе, когда конвекция начинает достигать дна и происходит баротропизация жидкости, E_{sp} начинает уменьшаться. На графике межгодовой изменчивости видно, что зимой 2008 и 2009 гг. E_{sp} снижалась до минимальных значений во всем столбе жидкости. Также, как и в центре бассейна, E_{sp} характеризуется значительными короткопериодными колебаниями, наличием резких пиков и ослаблений, особенно заметных в осенний период, которые зависят в первую очередь от проникновения в эту область вод речных пломов, а также от прохождения фронтов, связанных с более крупными синоптическими вихрями.



Р и с. 9. Межгодовая изменчивость энергии субмезомасштабных процессов ($L < 10$ км) в центре (a) и на шельфе (b) Черного моря

F i g. 9. Interannual variability of the sub-mesoscale processes energy ($L < 10$ km) in the central (a) and shelf (b) parts of the Black Sea

Выводы

В настоящей работе на основе результатов численного моделирования по модели *NEMO* с высоким пространственным разрешением 1 км, впервые проведено исследование сезонной и вертикальной изменчивости субмезомасштабных течений в центральной и шельфовой частях Черного моря.

Наиболее высокие значения спектральной энергии субмезомасштабной динамики E_{sp} в центральной части моря сосредоточены в ВКС. В зимний период при увеличении ВКС наблюдается сезонный пик E_{sp} в слое 0–40 м,

в летний период относительно высокие значения наблюдаются в верхнем (0–20 м) ВКС и сезонном термоклине. Такая сезонная изменчивость свидетельствует в пользу определяющей роли бароклинной неустойчивости вод, возникающей из-за неоднородности ВКС [32], в генерации субмезомасштабных процессов в центральной части Черного моря. В пользу данной версии свидетельствует и значительное сходство изменчивости спектральной энергии флуктуаций плотности и скорости для исследуемых районов Черного моря.

В то же время в глубинных слоях 50–250 м высокие значения E_{sp} наблюдаются в апреле – мае (рис. 5), что, возможно, связано с генерацией в этот период интенсивных антициклонов, сдвиговая неустойчивость на периферии которых приводит к образованию субмезомасштабных вихрей [34] под слоем основного пикноклина.

Энергия колебаний в центральной части шельфовой зоны (СЗШ) ниже, чем в центре моря, и имеет совершенно отличный сезонный ход. Максимальные значения E_{sp} отмечаются в августе – октябре с пиком в октябре. Основной причиной этого осеннего максимума является адвекция опресненных реками вод в центр СЗШ под действием интенсифицирующихся в этот период синоптических вихрей. Возникающие в результате градиенты солёности, а также баротропная сдвиговая неустойчивость приводят к возникновению интенсивных бароклиных субмезомасштабных вихрей. При этом вертикальная протяжённость области высоких значений E_{sp} растёт от августа до января, что совпадает с динамикой заглупления ВКС. В феврале отмечается минимум E_{sp} по всей глубине, связанный с баротропизацией водной толщи при полном зимнем конвективном перемешивании.

Изменчивость энергии субмезомасштабной динамики носит пульсационный характер с кратковременными интенсификациями и ослаблениями и связывается с прохождением синоптических фронтов и кросс-шельфовым переносом вод под влиянием вихрей и апвеллингов, которые связаны с бароклинной неустойчивостью вод, а также влиянием интенсивных штормов и выхолаживанием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McWilliams J. C.* Submesoscale currents in the ocean // *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 2016. Vol. 472, iss. 2189. 20160117. doi:10.1098/rspa.2016.0117
2. *Klein P., Lapeyre G.* The Oceanic Vertical Pump Induced by Mesoscale and Submesoscale Turbulence // *Annual Review of Marine Science.* 2009. Vol. 1. P. 351–375. doi:10.1146/annurev.marine.010908.163704
3. Mesoscale to Submesoscale Transition in the California Current System. Part II: Frontal Processes / X. Capet [et al.] // *Journal of Physical Oceanography.* 2008. Vol. 38, iss. 1. P. 44–64. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3672.1>
4. *Thomas L. N., Tandon A., Mahadevan A.* Submesoscale processes and dynamics // *Ocean Modeling in an Eddying Regime* / eds. M. W. Hecht, H. Hasumi. Washington, D. C. : American Geophysical Union, 2008. С. 17–38. (Geophysical Monograph Series ; vol. 177). doi:10.1029/177GM04
5. *Mahadevan A., Tandon A.* An analysis of mechanisms for submesoscale vertical motion at ocean fronts // *Ocean Modelling.* 2006. Vol. 14, iss. 3–4. С. 241–256. doi:10.1016/j.ocemod.2006.05.006

6. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / А. А. Алескерова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 53–64. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-53-64
7. Распределение взвешенного вещества у западного побережья Крыма при воздействии сильных ветров различных направлений / А. А. Алескерова [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 74–88. doi:10.31857/S0205-96142019274-88
8. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Zatsepin A. G.* Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem // Journal of Marine Systems. 2018. Vol. 179. P. 10–30. doi:10.1016/j.jmarsys.2017.11.001
9. Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the Black Sea / A. Zatsepin [et al.] // Ocean Dynamics. 2019. Vol. 69, iss. 2. P. 253–266. doi:10.1007/s10236-018-1239-4
10. *Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu.* Satellite SAR observations of atmospheric and oceanic vortex structures in the Black Sea coastal zone // Advances in Space Research. 2006. Vol. 38, iss. 10. P. 2162–2168. doi:10.1016/j.asr.2006.03.022
11. Submesoscale circulation in the northern Gulf of Mexico: Surface processes and the impact of the freshwater river input / H. Luo [et al.] // Ocean Modelling. 2016. Vol. 101. P. 68–82. doi:10.1016/j.ocemod.2016.03.003
12. Investigation of fine spatial structure of currents and submesoscale eddies based on satellite radar data and concurrent acoustic measurements / O. Lavrova [et al.] // Proceedings of SPIE, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2012. Vol. 8532. 85320L. doi:10.1117/12.970482
13. *Karimova S. S., Lavrova O. Yu., Solov'ev D. M.* Observation of eddy structures in the Baltic Sea with the use of radiolocation and radiometric satellite data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2012. Vol. 48, iss. 9. P. 1006–1013. doi:10.1134/S0001433812090071
14. *Алескерова А. А., Кубряков А. А., Станичный С. В.* Распространение взвешенного вещества под влиянием штормовых ветров у западного побережья Крыма по оптическим данным высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 1. С. 63–71.
15. Submesoscale eddies at the caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation / A. G. Zatsepin [et al.] // Oceanology. 2011. Vol. 51, iss. 4. 554. doi:10.1134/S0001437011040205
16. Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the Black Sea / A. Zatsepin [et al.] // Ocean Dynamics. 2019. Vol. 69, iss. 2. P. 253–266. doi:10.1007/s10236-018-1239-4
17. Statistics of vertical vorticity, divergence, and strain in a developed submesoscale turbulence field / A. Y. Shcherbina [et al.] // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40, iss. 17. P. 4706–4711. doi:10.1002/grl.50919
18. The seasonal cycle of submesoscale flows / L. Brannigan [et al.] // Ocean Modelling. 2015. Vol. 92. P. 69–84. doi:10.1016/j.ocemod.2015.05.002
19. Seasonality in submesoscale turbulence / J. Callies [et al.] // Nature Communications. 2015. T. 6. 6862. doi:10.1038/ncomms7862
20. Seasonality of the submesoscale dynamics in the Gulf Stream region / J. A. Mensa [et al.] // Ocean Dynamics. 2013. Vol. 63, iss. 8. P. 923–941. doi:10.1007/s10236-013-0633-1
21. Open-Ocean Submesoscale Motions: A Full Seasonal Cycle of Mixed Layer Instabilities from Gliders / A. F. Thompson [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 2016. Vol. 46, iss. 4. P. 1285–1307. doi:10.1175/JPO-D-15-0170.1
22. *Demyshev S. G., Dymova O. A.* Numerical analysis of the mesoscale features of circulation in the Black Sea coastal zone // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013. Vol. 49, iss. 6. P. 603–610. doi:10.1134/S0001433813060030

23. Моделирование субмезомасштабной изменчивости морских течений в прибрежной зоне Черного моря / Б. В. Дивинский [и др.] // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 6. С. 903–908. doi:10.7868/S0030157415060039
24. *Залесный В. Б., Гусев А. В., Агошков В. И.* Моделирование циркуляции Черного моря с высоким разрешением прибрежной зоны // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 3. С. 316–333. doi:10.7868/S0002351516030147
25. NEMO ocean engine / G. Madec [et al.]. IPSL, 2016. 386 p. (Note du pôle de modélisation IPSL, № 27). URL: <http://www.nemo-ocean.eu/doc/> (date of access: 10.12.2020).
26. Long-Term variability of thermohaline characteristics of the Azov Sea based on the numerical eddy-resolving model / A. I. Mizyuk [et al.] // *Physical Oceanography*. 2019. Vol. 26, iss. 5. P. 438–450. doi:10.22449/1573-160X-2019-5-438-450
27. *Zalesak S. T.* Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids // *Journal of Computational Physics*. 1979. Vol. 31, iss. 3. P. 335–362. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(79\)90051-2](https://doi.org/10.1016/0021-9991(79)90051-2)
28. *Rodi W.* Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1987. Vol. 92, iss. C5. P. 5305–5328. <https://doi.org/10.1029/JC092iC05p05305>
29. Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing / A. G. Zatsepin [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C8. 3246. doi:10.1029/2002JC001390
30. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2015. Vol. 97. P. 80–91. doi:10.1016/j.dsr.2014.12.002
31. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / [А. С. Блатов, Н. П. Булгаков, В. А. Иванов и др.]; под ред. Б. А. Нелепо. Л. : Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
32. The role of mixed-layer instabilities in submesoscale turbulence / J. Callies [et al.] // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 788. P. 5–41. doi:10.1017/jfm.2015.700
33. *Тумов В. Б.* Интегральный эффект воздействия термического и динамического факторов атмосферы на гидрологическую структуру вод Черного моря // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 6. С. 837–842.
34. Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием / А. А. Кубряков [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 449–468. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-449-468
35. Three-Dimensional Identification of the Black Sea Mesoscale Eddies according to NEMO Numerical Model Calculations / A. A. Kubryakov [et al.] // *Physical Oceanography*. 2018. Vol. 25, iss. 1. P. 18–26. doi:10.22449/1573-160X-2018-1-18-26

Об авторах:

Пузина Оксана Сергеевна, младший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-1637-4475**, oksana_puzina@mhi-ras.ru

Кубряков Арсений Александрович, старший научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3561-5913**, arskubr@mhiras.ru

Мизюк Артем Игоревич, старший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID:0000-0003-4885-354X**, **ResearchID: C-6125-2016**, artem.mizuk@mhi-ras.ru