

Расчет и анализ энергетики циркуляции вод в прибрежных районах Черного моря

© 2017 С.Г. Демышев, О.А. Дымова*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: olgadym@yahoo.com*

Поступила в редакцию 25.07.2016 г. После доработки 13.10.2016 г.

Представлены результаты анализа компонентов бюджета кинетической и потенциальной энергии Черного моря, рассчитанных с помощью вихреразрешающей модели Морского гидрофизического института. Численные эксперименты выполнены с пространственным разрешением 1,6 км при учете реального атмосферного воздействия за 2006 г. Рассмотрена пространственно-временная изменчивость слагаемых в уравнениях бюджета кинетической и потенциальной энергии на среднегодовом и сезонном масштабах для отдельных районов моря.

Показано, что энергетически наиболее значимыми компонентами бюджета были работа силы плавучести в северной и северо-восточной частях моря, работа силы ветра в южной его части, работа силы давления и сил трения над свалом глубин в зоне Основного Черноморского течения. Формирование мезомасштабных вихрей у Черноморских побережий Крыма и Северного Кавказа происходило преимущественно в весенне-летний сезон в результате бароклинной неустойчивости. Основной фактор, определяющий мезомасштабную динамику у южного и юго-восточного побережий во все сезоны при слабом ветре, – влияние особенностей береговой черты на периферию Основного Черноморского течения.

Ключевые слова: Черное море, численное моделирование, кинетическая энергия, потенциальная энергия, мезомасштабные вихри.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-3-49-62

Введение. С развитием современных методов контактного и дистанционного зондирования вод Мирового океана стали доступны данные о вихревых структурах с пространственными размерами порядка нескольких километров и временной изменчивостью с масштабом от нескольких суток до нескольких недель. Относительно локального бароклинного радиуса деформации Россби R_d эти структуры разделяют на мезомасштабные квазигеострофические вихри с радиусом больше R_d , для которых число Россби Ro гораздо меньше единицы, и субмезомасштабные агеострофические вихри с радиусом меньше R_d и значением числа $Ro \sim 1$ [1]. В прибрежной зоне Черного моря, где R_d в среднем составляет 7,5 км, наблюдаются оба типа вихрей [2, 3]. Необходимость исследования циркуляции на масштабе менее 10 км диктуется несколькими причинами. Во-первых, вихревые структуры мезо- и субмезомасштабного характера могут осуществлять обмен массой, теплом и солью между прибрежной и глубоководной частями и тем самым играть существенную роль в гидродинамике Черного моря. Во-вторых, итоги работ по проекту *MyOcean*, в котором проведено сравнение результатов численных расчетов циркуляции по трем моделям с разрешением от 5 до 8 км по горизонтали [4], продемонстрировали, что горизонтальное разрешение может существенно влиять на точность прогноза гидрофизических характеристик. Кроме того,

для решения задач мониторинга прибрежных экосистем востребована подробная информация о состоянии морской среды. Изучению и предсказанию последствий природных катастрофических явлений Азово-Черноморского региона на основе численных моделей было посвящено множество работ С.Ф. Доценко [5].

Существует несколько вихререзающих моделей динамики Черного моря. В Институте вычислительной математики РАН и Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН разработаны модели с высоким разрешением [6, 7], с помощью которых исследуется изменчивость в Черном и Азовском морях. Ряд диагностических и прогностических экспериментов по расчету гидрофизических полей Черного моря выполнен с использованием моделей *POM* [8], *NEMO* [9] и МГИ [10] с учетом реального воздействия атмосферы и спутниковой информации.

Эффективным инструментом для оценки роли различных физических факторов в динамике течений является анализ энергетического баланса в моделируемой системе. В статье [11] численные оценки баланса кинетической энергии используются при выборе критериев окончания адаптационных расчетов гидродинамических характеристик. В работе [12] выполнен численный анализ энергетических переходов при изучении механизмов генерации аномалий гидрофизических параметров в Северном Ледовитом океане. В книге [13] рассчитан энергетический цикл Мирового океана с акцентом на вклад мезомасштабных вихрей в энергетику глобальной циркуляции. Энергетические балансы полузамкнутых морей (в том числе и Черного моря) приведены в работе [14], в которой показано, что работа силы плавучести является одним из основных факторов формирования мезомасштабных особенностей динамики в полузамкнутых морях.

Энергетика климатической циркуляции Черного моря, рассчитанная на сетке 5×5 км, представлена в статье [15], в которой определены пять энергоактивных зон, расположенных вдоль свала глубин в районе северо-западного шельфа (СЗШ), у западной части Анатолийского побережья, в юго-западном углу моря, в центральной части Кавказского побережья и около восточного Крыма. В работе [16] на основе конечно-разностных уравнений изменения кинетической (КЭ) и потенциальной энергии (ПЭ) рассчитаны составляющие бюджета энергии в 2006 г. с горизонтальным разрешением 1,6 км при учете реального атмосферного воздействия. Проведен анализ осредненных за год и за каждый сезон интегральных компонентов бюджета КЭ и ПЭ. Показано, что в течение 2006 г. изменение энергии Черного моря определялось преимущественно балансом между вкладами работ силы плавучести, сил трения и силы ветра.

Статья посвящена исследованию энергетики Черного моря и является продолжением анализа результатов численного эксперимента [16]. Рассмотрена пространственно-временная изменчивость проинтегрированных по вертикали энергетических характеристик. Целью данной работы было проанализировать наиболее энергетически значимые компоненты бюджета кинетической и потенциальной энергии и определить возможные механизмы формирования и эволюции мезомасштабных вихрей.

Численный эксперимент. Исходя из предположения, что $\langle \varphi \rangle^H = \int_0^H \varphi dz$,

энергетические уравнения в символьном виде можно записать следующим образом [15]:

$$\begin{aligned} \langle E_t \rangle^H = & \zeta_t E_0 - g \left(\zeta^2 / 2 \right)_t - Adv_{\text{hor}}(P) - Adv_{\text{hor}}(E) + \langle \Pi \leftrightarrow E \rangle^H + \\ & + \tau \rightarrow E - Diss_{\text{bif}}(E) - \langle Diss_{\text{ver}}(E) \rangle^H - \langle Diss_{\text{hor}}(E) \rangle^H, \end{aligned} \quad (1)$$

где E_t – скорость изменения КЭ; ζ – возвышение свободной поверхности; $E_0 = E(x, y, 0, t)$; $Adv_{\text{hor}}(P) = \langle (uP)_x + (vP)_y \rangle^H$ – работа силы давления; $Adv_{\text{hor}}(E) = \langle (uE)_x + (vE)_y \rangle^H$ – адвекция КЭ; $\langle \Pi \leftrightarrow E \rangle^H = \langle gwp \rangle^H$ – работа силы плавучести; $\tau \rightarrow E = u_0 \tau^x + v_0 \tau^y$ – работа касательных напряжений

трения ветра; $Diss_{\text{bif}}(E) = v_V \left(\frac{(u^2)_z}{2} \Big|_{z=H(x,y)} + \frac{(v^2)_z}{2} \Big|_{z=H(x,y)} \right)$ – изменение КЭ

за счет трения о дно; $\langle Diss_{\text{ver}}(E) \rangle^H = v_V (uu_z + vv_z)_z$ – изменение КЭ за счет вертикального внутреннего трения; $\langle Diss_{\text{hor}}(E) \rangle^H = v_H [(\nabla^2 u)^2 + (\nabla^2 v)^2]$ – изменение КЭ за счет горизонтального трения, куда входит внутреннее горизонтальное трение и трение о боковые стенки.

$$\begin{aligned} \langle \Pi_t \rangle^H = & -Adv_{\text{hor}}(\Pi) - \langle \Pi \leftrightarrow E \rangle^H + \langle Diff_{\text{hor}}(\Pi) \rangle^H - \\ & - \langle Diff_{\text{ver}}^{\kappa_V}(\Pi) \rangle^H + \langle Diff_{\text{ver}}^{\text{sur-bot}}(\Pi) \rangle^H - \langle Diff_{\text{ver}}^{\text{add}}(\Pi) \rangle^H, \end{aligned} \quad (2)$$

где Π_t – скорость изменения ПЭ; $Adv_{\text{hor}}(\Pi) = \langle (u\Pi)_x + (v\Pi)_y \rangle^H$ – адвекция ПЭ; $\langle Diff_{\text{hor}}(\Pi) \rangle^H = \langle -\kappa_H (\nabla^4 \Pi - gzQ_H) \rangle^H$ – изменение ПЭ за счет горизонтальной турбулентной диффузии; $\langle Diff_{\text{ver}}^{\kappa_V}(\Pi) \rangle^H = \langle g\rho(\kappa_V)_z \rangle^H$ – изменение ПЭ за счет неоднородности коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по глубине; $\langle Diff_{\text{ver}}^{\text{sur-bot}}(\Pi) \rangle^H = g(\kappa_V \rho)_{z=0} - g(\kappa_V \rho)_{z=H(x,y)}$ – изменение ПЭ за счет разницы между придонной и поверхностной плотностями; $\langle Diff_{\text{ver}}^{\text{add}}(\Pi) \rangle^H = g \langle z\kappa_V Q_V \rangle^H$ – слагаемое, возникающее при интегрировании уравнения состояния вследствие его нелинейного характера. Остальные обозначения общеприняты.

В отличие от работы [15], в настоящем исследовании расчеты выполнены на сетке 1,6 км, вертикальные турбулентные процессы параметризованы на основе теории Меллора – Ямады уровня замыкания 2.5 [17], учтены ветер, потоки тепла, осадков и испарения, полученные по данным атмосферной модели ALADIN [18]. Для задания гидродинамических характеристик в устьях рек и проливах использованы климатические данные [19]. Для удобства восприятия знак интегрирования по вертикали $\langle \rangle^H$ далее в тексте опущен.

Анализ результатов. На рис. 1 представлено пространственное распределение некоторых осредненных за год слагаемых уравнений (1), (2). Адвекция КЭ на среднегодовом масштабе характеризовалась близкими к нулю значениями, малыми по сравнению со значениями других слагаемых. Из рис. 1, *а* видно, что максимальные и минимальные значения работы силы давления наблюдаются между изобатами 200 – 900 м в западной части моря и у берегов Турции. В этих же районах над свалом глубин выявлены наибольшие среднегодовые значения скорости в стрежне Основного Черноморского течения (ОЧТ), которые приводят к росту величины адвективной производной и, соответственно, интенсификации работы силы давления. В зоне Батумского антициклона расположены взаимно компенсационные области величины $Adv_{hor}(P)$, поэтому суммарный вклад работы силы давления в изменение КЭ в этом районе в среднем за год незначителен. Среднегодовое распределение работы силы плавучести представлено на рис. 1, *б*. Работа силы плавучести зависит от вертикальной скорости и плотности: $\Pi \leftrightarrow E = gwr$. Сопоставление с картами вертикальной скорости показало, что в глубоководной части (за исключением юго-восточного угла моря) области положительных и отрицательных значений величины $\Pi \leftrightarrow E$ соответствуют зонам опускания и подъема уровня воды, которые определяются знаком вертикальной скорости. На СЗШ преобладают положительные значения $\Pi \leftrightarrow E$, при этом корреляция с пространственным распределением вертикальной скорости не выявлена. Следовательно, работа силы плавучести на СЗШ в большей степени была обусловлена полем плотности, которое определялось потоками тепла, осадков и испарения на поверхности моря и втоками пресных речных вод. В среднем за год в этом районе наблюдался переход доступной потенциальной энергии (ДПЭ) в КЭ и тем самым происходило выравнивание изопикнических поверхностей. Таким образом, за исследуемый период времени в районе СЗШ процессы охлаждения и зимней конвекции были энергетически более значимы по сравнению с весенне-летним прогревом вод и формирование мезомасштабных вихрей, по мнению авторов, происходило на фоне баротропизации течений. Однако данный вывод является лишь предположением, так как оценить баротропную и бароклинную составляющие кинетической энергии (как, например, в работе [20]) на основе используемого нами подхода затруднительно.

В среднем за год КЭ возрастала за счет притока от ветра: наибольший вклад отмечен в юго-западном углу моря и у восточной части Анатолийского побережья (рис. 1, *в*). Такое распределение обусловлено полем напряжений трения ветра. Анализ поля ветра показал, что в 2006 г. наиболее сильные и часто повторяющиеся ветра имели северо-восточное направление с максимальными значениями скорости у западного побережья. Отрицательные значения работы силы ветра около западной части Анатолийского побережья (рис. 1, *в*) означают, что ветер и течения на поверхности направлены в противоположные стороны: ОЧТ направлено на северо-восток, а вектор напряжения ветра – преимущественно на юго-запад. Вследствие этого развиваются процессы сдвиговой неустойчивости, которые являются одним из механизмов образования мезомасштабных вихрей [21]. Анализ карт мгновенных течений и поля ветра показал, что в указанном районе при слабых ветрах в результате набегания течения на береговые выступы вихревые структуры фор-

мировались между ОЧТ и берегом. При сильных ветрах вихри не наблюдались. Таким образом, около западной части Анатолийского побережья в среднем за год влияние ветра на структуру циркуляции оказалось энергетически более слабым по сравнению с влиянием орографических особенностей береговой черты.

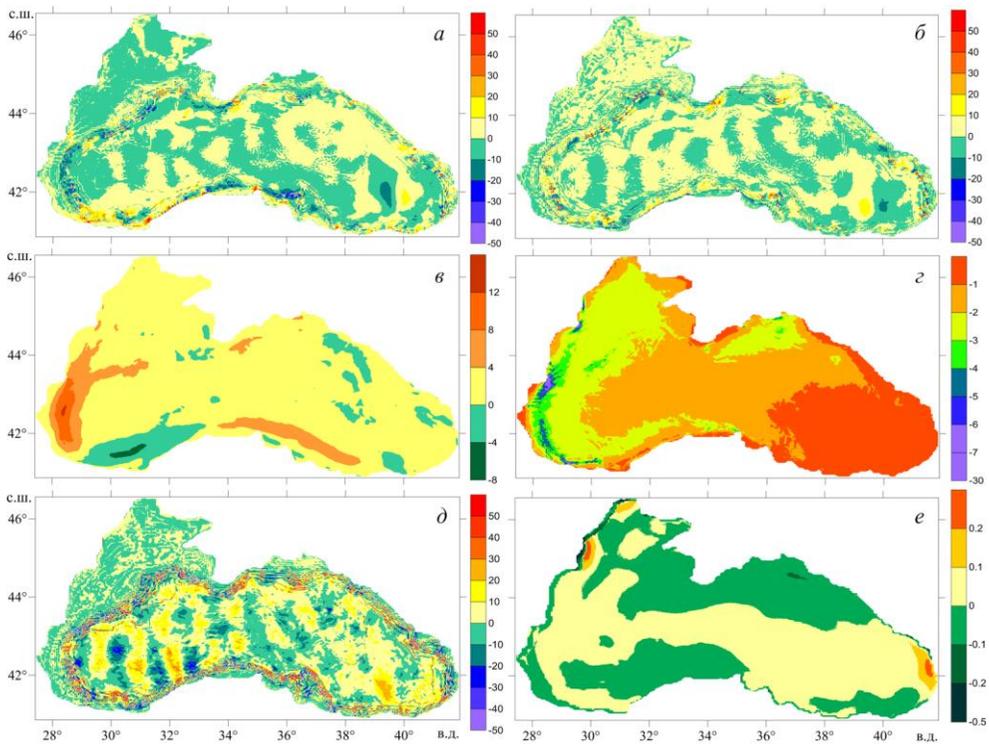


Рис. 1. Осредненные за год слагаемые (эрг/см²) в уравнениях (1), (2): *a* – $Adv_{hor}(P)$; *б* – $\Pi \leftrightarrow E$; *в* – $\tau \rightarrow E$; *з* – $Diss_{ver}(E)$; *д* – $Adv_{hor}(\Pi)$; *е* – $Diff_{ver}^{sur}(\Pi)$

Значительные потери КЭ вследствие вертикального трения выявлены в районе юго-восточного побережья Крыма и западной части Черного моря с максимальными значениями у берегов Румынии и Болгарии (рис. 1, з), что объясняется интенсификацией процессов перемешивания и вертикального обмена в зонах, где были отмечены наиболее сильные и часто повторяющиеся ветры. При расчете $Diss_{ver}(E)$ касательные напряжения трения ветра непосредственно учитываются в качестве краевых условий не только в уравнениях движения, но и при вычислении коэффициентов вертикального обмена с использованием параметризации Меллора – Ямады [17]. Поэтому усиление ветра приводит к увеличению вертикального градиента скорости, коэффициентов вертикального турбулентного обмена и, как следствие, к большим по модулю значениям $Diss_{ver}(E)$. Сток КЭ за счет горизонтальной диссипации наиболее интенсивен в струе ОЧТ. Так как коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости постоянны, то потеря КЭ в результате трения зависит исключительно от величины горизонтальных градиентов скорости, которые

в ОЧТ имеют большие значения, чем в остальных областях моря. При этом основной вклад в величину $Dis_{shor}(E)$ вносили верхние модельные горизонты в зимний период, когда ОЧТ наиболее интенсивно. Летом вследствие ослабления ОЧТ и ветров развиваются многочисленные вихри различных масштабов и уменьшаются потери энергии вследствие горизонтального трения по сравнению с холодным сезоном.

В среднем за 2006 г. самые значимые вклады в изменение ПЭ вносили потоки тепла и соли на поверхности моря и адвекция ПЭ. Наибольшие по модулю значения адвективного слагаемого в уравнении (2) локализованы над свалом глубин (рис. 1, *д*), где увеличение скорости в ядре ОЧТ приводит к интенсификации адвективного переноса. В глубоководной части моря к западу от 35° в. д. наблюдалось чередование зон положительных и отрицательных значений величины $Adv_{hor}(П)$. Аналогичная структура с обратным знаком прослеживалась в распределении слагаемого $Adv_{hor}(P)$ на рис. 1, *а*. Эти компоненты баланса энергии являются взаимно-компенсационными, их поведение определяется вертикальной скоростью. В работе [22] указывается на наличие в Черном море стоячих волн Россби, структура которых по пространственно-временным масштабам соответствует распределению характеристик на рис. 1, *а* и 1, *д*.

В пространственном распределении осредненного за год члена $Diff_{ver}^{sur}(П)$ (рис. 1, *е*) выявлено соответствие среднегодовому пространственному распределению полного потока тепла из атмосферы: там, где поток тепла направлен из атмосферы в море (вода нагревается), слагаемое $Diff_{ver}^{sur}(П)$ имеет положительное значение. Таким образом, на среднегодовом масштабе поток тепла наиболее значительно влияет на изменение ПЭ в верхнем слое. Максимальные значения $Diff_{ver}^{sur}(П)$ в районах устьев рек Дунай и Риони (рис. 1, *е*) обусловлены весенней интенсификацией речного стока. При увеличении разности между поверхностной и придонной плотностями (то есть при увеличении значения вертикального градиента плотности) растет отклонение изопикнических поверхностей от среднего «невозмущенного» уровня и, как следствие, повышается запас ДПЭ. Из литературы известно, что ДПЭ является источником энергии мезомасштабных вихрей [23]. Слагаемое $Diff_{ver}^{add}(П)$ мало по сравнению с другими компонентами баланса ПЭ, поэтому в дальнейшем не рассматривается.

Таким образом, из рис. 1 видно, что наиболее интенсивный энергообмен в 2006 г. происходил в районах ОЧТ, у западного побережья, в юго-восточной части моря, около Крымского и Анатолийского побережий. Ниже представлены результаты анализа сезонной изменчивости компонентов бюджета КЭ и ПЭ. Значения проинтегрированных по вертикали энергетических слагаемых в уравнениях (1) и (2) были осреднены посезонно. Для каждого сезона оценены наибольшие вклады в баланс энергии. Мы рассматривали гидрологические сезоны, то есть трехмесячные периоды, начинающиеся 1 января, 1 апреля, 1 июля и 1 октября.

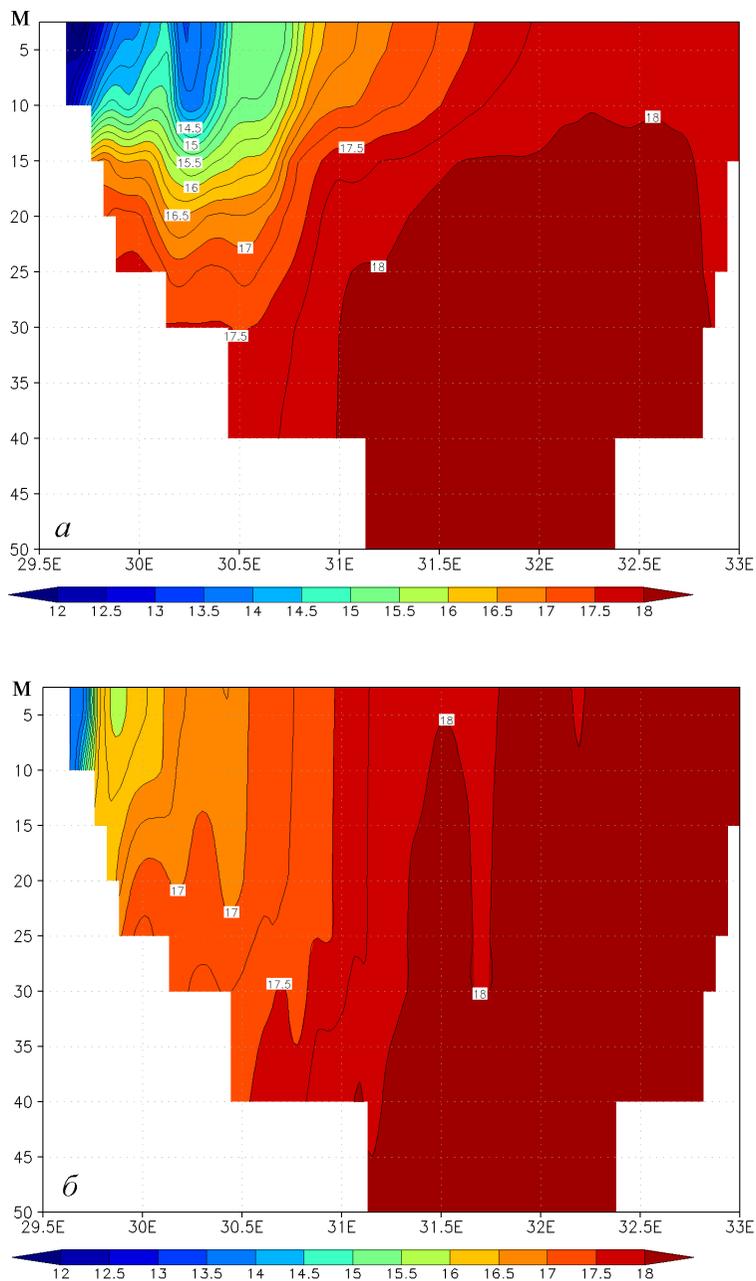


Рис. 2. Поле солёности (%) на разрезе 45,2° с. ш.: а – 22.05.06 г., б – 23.12.06 г.

Для СЗШ и западного побережья в осенне-зимний сезон наиболее значимые компоненты баланса КЭ – вклад от ветра и потери вследствие вертикального трения. Эти величины характеризуют перестройку поля течений, вызванную штормовыми ветрами (скорости ветра порядка 10 м/с и более) над западной частью моря в холодный период. В это время в поле скорости

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ № 3 2017 55

наблюдались струйные течения, направленные преимущественно на юго-запад. В западной части моря вклад величины $Adv_{hor}(P)$ в КЭ имел наибольшие значения над свалом глубин во все сезоны года. Изменчивость ПЭ в районе СЗШ наиболее интенсивна весной и летом в результате усиления речного стока. На рис. 2 представлены карты поля солёности на разрезе, соответствующем широте устья р. Дунай для холодного и теплого сезонов. Видно, что весной вток речных вод приводит к изгибу изохалин, в то время как зимой они практически вертикальны. Таким образом, ПЭ растёт вследствие увеличения разницы между поверхностной и придонной плотностями. При этом возрастает отклонение изопикнических поверхностей от невозмущенного уровня, что приводит к увеличению запаса ДПЭ.

Сезонная изменчивость слагаемых $\tau \rightarrow E$ и $Diss_{ver}(E)$ у **крымского побережья** определяется тем же фактором, что и на западном побережье, а именно: заданными полями напряжения трения ветра. Это значит, что в осенне-зимний сезон вклад от ветра и потеря вследствие трения – наиболее значимые компоненты баланса энергии, а течения носят преимущественно струйный характер. Во все сезоны года у юго-восточного побережья Крыма наблюдаются взаимно компенсационные зоны $Adv_{hor}(E)$ и $Adv_{hor}(P)$, в итоге доминирующей величиной в балансе КЭ становится работа силы плавучести (рис. 3), значение которой определяется знаком вертикальной скорости. Это значение большую часть времени положительно, то есть потенциальная энергия переходит в кинетическую. При отсутствии сильных ветров этот процесс завершается формированием короткоживущих мезомасштабных вихрей в поле скорости.

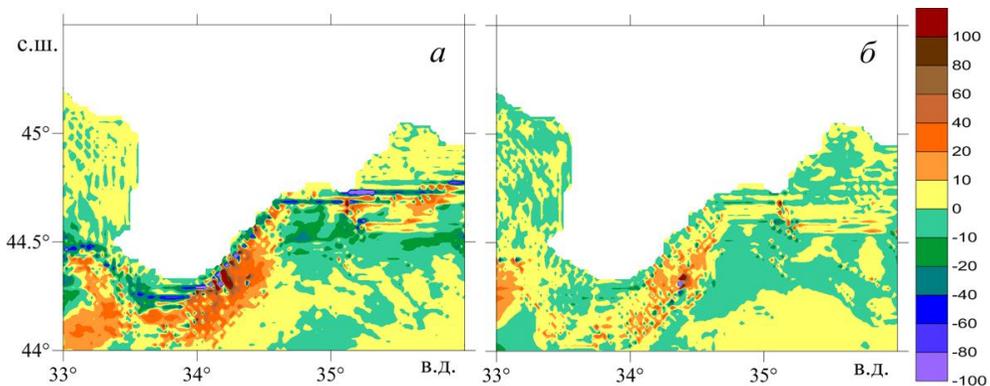


Рис. 3. Осредненная за сезон работа силы плавучести ($\text{эрг}/\text{см}^2$): *а* – зимой, *б* – летом

В балансе ПЭ в холодный период года преобладает слагаемое $Diff_{ver}^{k_v}(\Pi)$, величина которого максимальна в Каркинитском заливе. Механизм изменения $Diff_{ver}^{k_v}(\Pi)$ следующий. С увеличением глубины значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии k_v уменьшается. А так как оно рассчитывается с использованием параметризации Меллора – Ямады [17], в которой ветер учитывается непосредственно в качестве граничного условия на поверхности, то при сильных и длительных ветрах в холодные сезоны года вертикальный

диффузионный поток возрастает за счет увеличения вертикального градиента $(\kappa_v)_z$. Весной прирост ПЭ определяется большими положительными значениями полного вертикального диффузионного потока около побережий Крыма и Кавказа, усиление которого соответствует заданному потоку тепла на поверхности моря.

Анатолийское побережье в течение года характеризуется пространственно-временной неоднородностью компонентов бюджета КЭ и относительно однородным распределением составляющих бюджета ПЭ (за исключением $Adv_{hor}(П)$). Для удобства изложения побережье Турции к западу от 34° в. д. будем называть западной частью, к востоку от 34° в. д. – восточной. Западная часть отличается крутым континентальным склоном, восточная – относительно широким свалом глубин и изрезанностью береговой черты. Зимой и осенью работа силы давления уменьшает КЭ в восточной части и увеличивает в западной. В холодный период года, когда вода охлаждается, возрастает плотность воды и, соответственно, давление. Увеличение давления и интенсификация течений над узким континентальным склоном в западной части приводят к значительному росту величины $Adv_{hor}(P)$. Во все сезоны у берегов Турции фиксируются области наиболее интенсивной диссипации КЭ. К усилению диссипативных процессов приводит интенсификация ОЧТ над узким континентальным склоном. При анализе распределения слагаемого $\tau \rightarrow E$, осредненного посезонно, выявлена следующая особенность: в западной части Анатолийского побережья работа силы ветра отрицательна, в восточной – положительна. Сопоставление карт течений на верхнем расчетном горизонте с пространственным распределением слагаемого, характеризующего мгновенную работу силы ветра, показало, что при слабых ветрах областям отрицательных значений $\tau \rightarrow E$ соответствуют зоны локализации мезомасштабных вихрей. На рис. 4 в качестве примера представлены поля течений и $\tau \rightarrow E$ на 19.03.06 г. Отметим, что значение модуля вектора касательных напряжений трения ветра над изучаемым районом на указанную дату изменяется в пределах $0,2 - 0,5$ дин/см², что соответствует скоростям приводного ветра в диапазоне $1,5 - 2$ м/с. Скорость ветра высчитывалась по формуле $\tau = \rho C_d |\vec{V}_{wind}|$ [24]. Из рис. 4 видно, что слагаемое $\tau \rightarrow E$ увеличивает кинетическую энергию ОЧТ (красные зоны), а около берега формируются области стока КЭ (синие зоны). Расположение областей стока КЭ (рис. 4, б) вдоль берега четко совпадает с локализацией мезомасштабных вихрей в поле скорости (рис. 4, а). Слагаемое $\tau \rightarrow E$ стоит в правой части выражения (1) и определяется произведением компонент векторов скорости течений и касательного напряжения трения ветра $(u_0\tau^x + v_0\tau^y)$. Если исследуемая величина отрицательна, то происходит торможение потока и при набегании на неровности береговой линии в шельфовых зонах формируются запрпятственные антициклонические вихри [25]. Глубина шельфа в восточной части Анатолийского побережья в среднем составляет 100 м. Следовательно, при слабом ветре орография берега оказывает существенное влияние на течения и за мысами в относительно мелководных районах возникают мезомасштабные вихри. При усилении ветра ОЧТ прижимается к берегу, площадь зон стока КЭ

уменьшается и мезомасштабные вихри в прибрежной зоне не развиваются. Таким образом, ослабление ветрового воздействия в сочетании с влиянием орографии береговой черты могут являться основными предпосылками для генерации мезомасштабных особенностей циркуляции в южной части Черного моря. Исходя из вышесказанного, мы предполагаем, что в областях, где слагаемое $\tau \rightarrow E$ отрицательно, КЭ течений трансформируется в вихревую энергию. Однако данная гипотеза требует дальнейшего исследования.

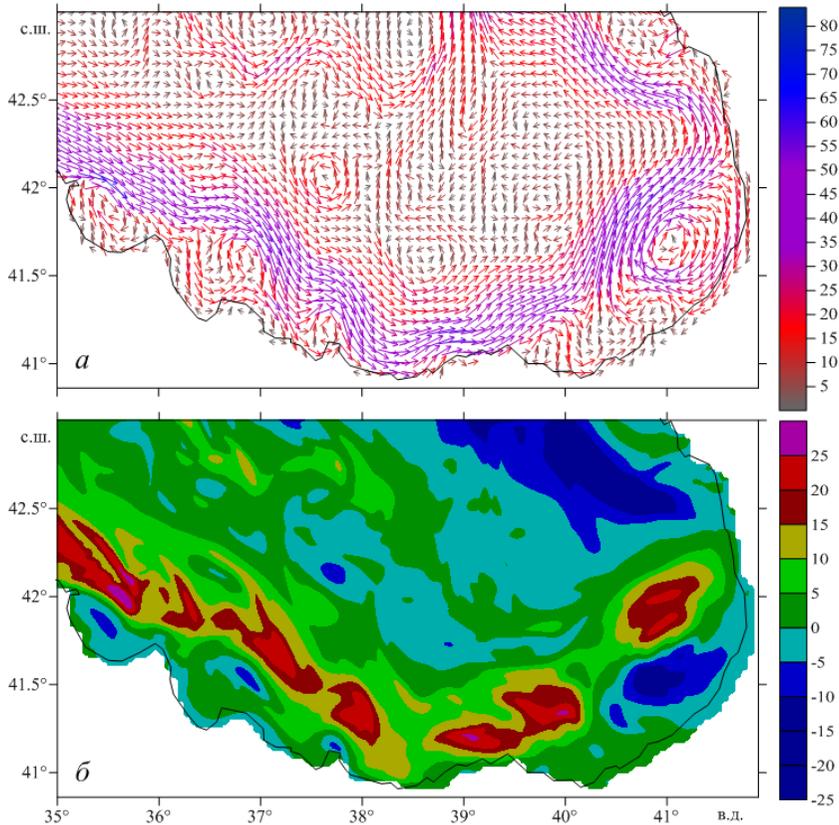


Рис. 4. Поле скорости (см/с) (а) и поле $\tau \rightarrow E$ (эрг/см²) (б) на 19.03.06

Несмотря на отсутствие значительных среднегодовых вкладов в изменение энергии в **районах Батумского и Севастопольского антициклонов**, адвективный перенос существен в этих областях на сезонном масштабе. Так, с весны формируются взаимно компенсационные области $Adv_{\text{hor}}(E)$ и $Adv_{\text{hor}}(P)$, соответствующие расположению антициклонов (рис. 5, а, б). В зонах соприкосновения антициклонов с основным циклоническим круговоротом наблюдаются наибольшие скорости течений, соответственно, возрастают и горизонтальные градиенты скорости. В результате этого вклад адвективных слагаемых увеличивается. В районе Батумского антициклона $Adv_{\text{hor}}(\Pi)$ вносит главный вклад в изменение ПЭ (рис. 5, в), что обусловлено большими градиентами скорости и большой величиной ПЭ в глубоководной части моря. Летом ОЧТ ослабевает, а Севастопольский и Батумский антициклоны

интенсифицируются, что в энергетическом аспекте приводит к увеличению площади областей, в которых адвективный перенос играет главную роль в энергообмене. В теплый период года по периферии Батумского антициклона наблюдается также рост величины $\Pi \leftrightarrow E$ (рис. 5, *з*). Многочисленные мелкие особенности изолиний в восточной части моря проявляются в результате осреднения по времени. Сопоставление мгновенных полей скорости и работы силы плавучести показало соответствие зон интенсивной изменчивости $\Pi \leftrightarrow E$, обусловленной изменением плотности, зонам локализации мезомасштабных вихрей, что свидетельствует об усилении процессов бароклинной неустойчивости. На юго-востоке в весенне-летний период за счет поступления речных вод возрастает вклад слагаемого $Diff_{ver}^{bot-sur}(\Pi)$ в изменение ПЭ, при этом растет запас ДПЭ вследствие увеличения отклонения изопикнических поверхностей от «невозмущенного» уровня. Для осеннего периода характерна интенсификация ОЧТ (увеличение скорости и уменьшение ширины потока), Севастопольский и Батумский антициклоны ослабевают, поэтому площадь областей, соответствующих большим значениям адвективных слагаемых в уравнении (1), уменьшается. Охлаждение вод и увеличение толщины верхнего квазиоднородного слоя приводят к росту ПЭ, однако запас ДПЭ уменьшается.

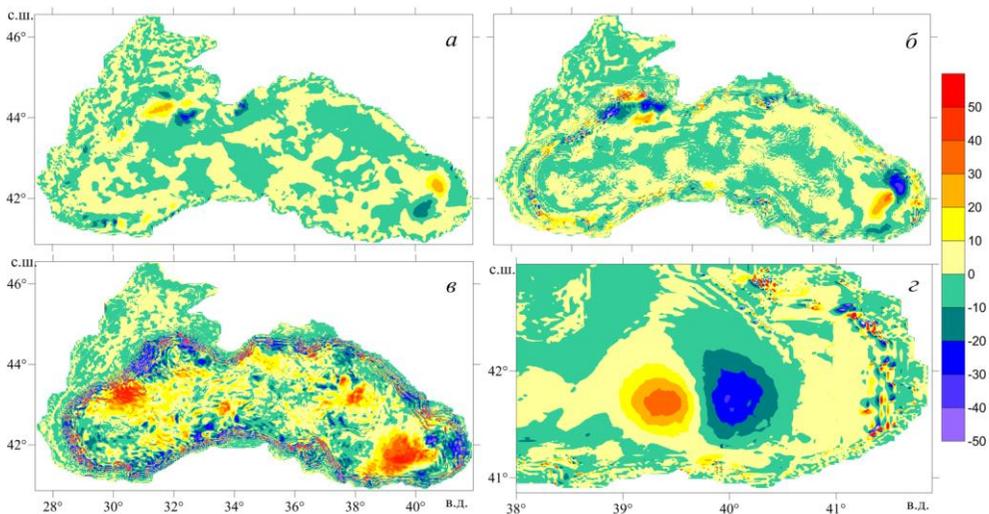


Рис. 5. Осредненные за весну адвективные потоки (эрг/см²): *a* – $Adv_{hor}(E)$, *б* – $Adv_{hor}(P)$, *в* – $Adv_{hor}(\Pi)$; *з* – $\Pi \leftrightarrow E$

Зоной, где происходит интенсивная трансформация энергии, является **ОЧТ**, стрежень которого локализован над континентальным склоном. Прежде всего, ОЧТ является основной областью стока энергии, обусловленного горизонтальными диссипативными и диффузионными процессами. В осенне-зимний период, когда ОЧТ наиболее интенсивно, потери КЭ вследствие горизонтального трения соизмеримы с величиной адвективных вкладов. Максимальный сток КЭ наблюдался западнее оконечности Крымского п-ова и около западной части Анатолийского побережья. Анализ изменения значения

$Diff_{hor}(E)$ с глубиной показал, что основная часть энергии терялась зимой в верхнем 75-метровом слое. Весной и летом работа силы трения уменьшилась на порядок. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости постоянный, поэтому величина потерь КЭ в результате трения определяется исключительно горизонтальным градиентом скорости течений. Уменьшение ПЭ, обусловленное горизонтальной диффузией, также наиболее велико в зоне ОЧТ, однако величина $Diff_{hor}(P)$ меняется слабо на межсезонном масштабе.

Выводы. В результате численного эксперимента рассчитаны компоненты бюджета кинетической и потенциальной энергии Черного моря в 2006 г. Рассмотрена пространственно-временная изменчивость основных сил, определяющих особенности циркуляции на среднегодовом и сезонном масштабах для различных районов моря. Анализ карт осредненных по вертикали компонентов бюджета энергии показал, что в среднем за 2006 г. наиболее интенсивный энергообмен происходил у западного побережья и в юго-восточной части Черного моря, около Крымского и Анатолийского побережий, в районе ОЧТ.

В холодный период у западного побережья и на СЗШ штормовые северо-восточные ветры обуславливали преимущественно струйный режим течений, а изменение КЭ года определялось балансом между вкладом работы силы ветра и потерей вследствие вертикального трения. Весной и летом в результате усиления речного стока на СЗШ увеличивались отклонения изопикнических поверхностей от «невозмущенного» уровня, что привело к увеличению запаса ДПЭ. Анализ работы силы плавучести в районе СЗШ показал, что при отсутствии сильных ветров ДПЭ переходила из потенциальной в кинетическую энергию, и в результате формировались мезомасштабные вихри.

Около Крымского побережья в течение года доминирующим компонентом баланса энергии была работа силы плавучести, при этом ее величина определялась знаком вертикальной скорости. Показано, что работа силы плавучести у берегов Крыма была преимущественно положительна, то есть потенциальная энергия переходила в кинетическую.

Основной вклад в изменение КЭ осенью и зимой возле Анатолийского побережья вносила работа силы давления, большая величина которой обусловлена интенсификацией адвективного переноса вследствие увеличения скоростей течений в стрежне ОЧТ. Анализ пространственного распределения работы силы ветра показал, что во все сезоны при ослаблении ветрового воздействия под влиянием орографии береговой черты возникали зоны стока КЭ, которая, по-видимому, трансформировалась в энергию мезомасштабных вихрей. При сопоставлении карт работы силы ветра с модельным полем скорости в южной части Черного моря в 2006 г. выявлено пространственное совпадение областей локализации мезомасштабных вихрей с зонами стока КЭ.

Наибольшие вклады в баланс энергии в районах Севастопольского и Батумского антициклонов вносили адвекции КЭ и ПЭ. Пространственно-временная изменчивость этих энергетических потоков обусловлена величиной горизонтальных градиентов скорости, которые возрастали при увеличении скорости течений в зонах соприкосновения антициклонов с ОЧТ. Область ОЧТ являлась зоной стока КЭ и ПЭ вследствие интенсивных горизонтальных диссипативных и диффузионных процессов, при этом зимой в верхнем 75-метровом слое терялась основная часть КЭ.

Работа выполнена по теме госзадания 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий» (шифр «Фундаментальная океанология»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A.* Submesoscale processes and dynamics // *Ocean Modeling in an Eddying Regime. Geophysical monograph series. Oceanography–Mathematical models.* – Washington, D.C.: American Geophysical Union. – 2008. – 177. – P. 17 – 38. – doi:10.1029/177GM04
2. *Karimova S.* Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data // *Advances in Space Research.* – 2012. – 50, No. 8. – P. 1107 – 1124. – doi:10.1016/j.asr.2011.10.027
3. *Zatsepin A.G., Baranov V.I., Kondrashov A.A. et al.* Submesoscale eddies at the Caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation // *Oceanology.* – 2011. – 51, No. 4. – P. 554 – 567. – doi:10.1134/S0001437011040205
4. *Demyshev S., Knysh V., Korotaev G. et al.* The MyOcean Black Sea from a scientific point of view // *Mercator Ocean Quarterly Newsletter.* – 2010. – No. 39. – P. 16 – 24.
5. *Доценко С.Ф., Иванов В.А.* Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. – Севастополь, 2010. – 174 с. – URL: http://meteo.geofaq.ru/books/612759_D9-E3D_docenko_s_f_ivanov_v_a_prirodnye_katastrofy_azovo_chernomors.pdf (дата обращения: 20.08.2016).
6. *Zalesny V.B., Gusev A.V., Moshonkin S.N.* Numerical model of the hydrodynamics of the Black Sea and the Sea of Azov with variational initialization of temperature and salinity // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* – 2013. – 49, No. 6. – P. 642 – 658. – doi:10.1134/S0001433813060133
7. *Ibraev R.A.* A study of the sensitivity of the model of the Black Sea current dynamics to the surface boundary conditions // *Oceanology.* – 2001. – 41, No. 5. – P. 615 – 621.
8. *Кубряков А.И.* Применение технологии вложенных сеток при создании системы мониторинга гидрофизических полей в прибрежных районах Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – Вып. 11. – С. 31 – 50.
9. *Мизюк А.И., Коротаев Г.К., Ратнер Ю.Б.* Адаптация модели NEMO для выполнения прогнозов в Черном море // *Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России: межд. науч. конф., 15 – 18 сентября 2014 г.: тез. докл.* – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. – С. 181 – 184.
10. *Demyshev S.G.* A numerical model of online forecasting Black Sea currents // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* – 2012. – 48, No. 1. – P. 120 – 132. – doi:10.1134/S0001433812010021
11. *Sarkisyan A.S.* On some problems and results of ocean modeling // *Oceanology.* – 1996. – 36, No. 5. – P. 607 – 617.
12. *Zalesny V.B., Ivchenko V.O.* Modeling the global circulation response and the regional response of the Arctic Ocean to the external forcing anomalies // *Oceanology.* – 2010. – 50, No. 6. – P. 829 – 840. – doi:10.1134/S0001437010060020
13. *Aiki H., Zhai X., Greatbatch R.J.* Energetics of the global ocean: the role of mesoscale eddies // *The Indo-Pacific Climate Variability and Predictability. Edition: World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate.* – 2016. – 7, Ch. 4. – P. 109 – 134.
14. *Cessi P., Pinardi N., Lyubartsev V.* Energetics of semiencloded basins with two-layer flows at the strait // *J. Phys. Oceanogr.* – 2014. – 44, No. 3. – P. 967 – 979. – doi:10.1175/JPO-D-13-0129.1
15. *Demyshev S.G.* Energy of the Black Sea climatic circulation. 1. Discrete equations of the time rate of change of kinetic and potential energy // *Meteorologiya i Gidrologiya.* – 2004. – 9. – P. 65 – 80.

16. *Demyshev S.G., Dymova O.A.* Analyzing intraannual variations in the energy characteristics of circulation in the Black Sea // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* – 2016. – 52, No. 4. – P. 386 – 393. – doi:10.1134/S0001433816040046
17. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* – 1982. – 20, Issue 4. – P. 851 – 875. – doi:10.1029/RG020i004p00851
18. *Farda A., Déué M., Somot S. et al.* Model ALADIN as regional climate model for Central and Eastern Europe // *Studia Geophysica et Geodaetica.* – 2010. – 54, Issue 2. – P. 313 – 332. – doi:10.1007/s11200-010-0017-7
19. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия.* – СПб.: Гидрометеоздат, 1991. – 428 с.
20. *Robinson A.R., Harrison D.E., Mintz Y. et al.* Eddies and the general circulation of an idealized oceanic gyre: a wind and thermally driven primitive equation numerical experiment // *J. Phys. Oceanogr.* – 1977. – 7, Issue 2. – P. 182 – 207. – doi:http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1977)007<0182:EATGCO>2.0.CO;2
21. *Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Станичный С.В. и др.* Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием // *Современные проблемы динамики океана и атмосферы: сб. ст.* – М.: ТРИАДА ЛТД, 2010. – С. 347 – 368.
22. *Stanev E., Rachev N.* Numerical study on the planetary Rossby modes in the Black Sea // *J. Marine Syst.* – 1999. – 21, Issues 1 – 4. – P. 283 – 306. – doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00019-6
23. *Коротчаев Г.К., Коснырев В.К., Куфтарков Ю.М.* О доступной потенциальной энергии и генерации мезомасштабных вихрей в океане // *Морские гидрофизические исследования.* – 1977. – 79, № 4. – С. 200 – 212.
24. *Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В.* Основные океанологические задачи теории мелкой воды. – Л.: Гидрометеоздат, 1968. – 300 с.
25. *Elkin D.N., Zatsepin A.G.* Laboratory investigation of the mechanism of the periodic eddy formation behind capes in a coastal sea // *Oceanology.* – 2013. – 53, No. 1. – P. 24 – 35. – doi:10.1134/S0001437012050062

Calculation and analysis of water circulation energetics in the Black Sea coastal regions

S.G. Demyshev, O.A. Dymova*

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
*e-mail: olgadym@yahoo.com

The results of analysis of the kinetic and potential energy budget components calculated using the MHI eddy-resolving model are represented. The numerical experiments are carried out with the spatial resolution 1.6 km under allowing for real atmospheric forcing in 2006. Temporal-spatial variability of the terms in the equations of kinetic and potential energy budget is considered on the average annual and seasonal scales for certain sea regions. It is shown that the most energy-significant budget components are the buoyancy force in the northern and northeastern parts of the Black Sea, the wind force in its southern part, and the pressure and friction forces above the continental slope in the RIM current zone. The mesoscale eddies nearby the Crimean and the North Caucasus coasts are formed mainly in a spring-summer season resulting from baroclinic instability. The basic factor conditioning mesoscale dynamics along the southern and the southeastern Black Sea coast in all the seasons and at a weak wind is the influence of the coastal features upon the RIM current periphery.

Keywords: Black Sea, numerical modeling, kinetic energy, potential energy, mesoscale eddies.