

С.Г. Демьшев, О.А. Дымова

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕЗОМАСШТАБНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
В ПЕРИОД ЯНВАРЬ – СЕНТЯБРЬ 2006 ГОДА**

В работе представлены результаты численного прогностического эксперимента по моделированию гидрофизических полей Черного моря в январе-сентябре 2006 г. Приведены особенности мезомасштабной и субмезомасштабной динамики вод для отдельных районов моря. Исследованы возможные физические механизмы формирования мезо- и субмезомасштабных вихрей на основе энергетического анализа. Показано, что летом 2006 г. интенсивный энергообмен наблюдается в зоне Батумского антициклона. При отсутствии значительной ветровой активности основной вклад в кинетическую энергию дает работа силы плавучести. Неоднородность в поле слабого ветра приводит к существенным изменениям полной вертикальной вязкости и полной вертикальной диффузии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черное море, мезомасштабная и субмезомасштабная изменчивость, энергетический анализ.*

Введение. Численное моделирование является мощным аппаратом для изучения процессов, происходящих в Мировом океане. Особое значение имеют региональные модели, поскольку позволяют не просто диагностировать водную динамику, но и исследовать причины и механизмы формирования тех или иных особенностей морской среды в конкретном районе. Одним из таких инструментов является численная нелинейная термогидродинамическая модель МГИ, которая успешно используется в системе анализа и прогноза гидрофизических полей Черного моря [1]. В настоящее время ведутся работы по усовершенствованию имеющегося варианта модели в направлении увеличения разрешающей способности и более точного описания вертикального турбулентного обмена и диффузии [2, 3]. Данные натурных контактных измерений подтверждают наличие мезомасштабной и субмезомасштабной изменчивости течений в верхнем слое Черного моря [4, 5], поэтому воспроизведение и исследование особенностей циркуляции с пространственными масштабами порядка десяти километров и временем жизни несколько суток является важной задачей современной океанологии.

В работе представлены некоторые результаты численного прогностического эксперимента, выполненного с учетом реального атмосферного воздействия для периода январь – сентябрь 2006 г. и рассматриваются возможные физические механизмы формирования мезо- и субмезомасштабных вихрей на основе энергетического анализа.

Постановка задачи. Полная постановка задачи описана в [3]. Здесь приведем только условия проведения эксперимента. Шаг по горизонталь-

ным координатам составил 1,6 км, по вертикали использовалось 27 горизонтов, шаг по времени равнялся 1,5 мин. В качестве начальных полей задавались трехмерные поля температуры, солёности, скоростей течений и уровень, полученные в рамках проекта «Оперативная океанография» [6]. Начальный момент соответствовал 2 января 2006 г. Интегрирование уравнений модели проводилось до 29 сентября 2006 г. На поверхности моря каждые сутки задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, осадков и испарения, полученные по данным региональной атмосферной модели «ALADIN»¹. Также на верхнем расчетном горизонте каждые сутки усваивалась температура поверхности моря (SST ²), которая была получена по данным спутника NOAA³ [7]. Процедура ассимиляции температуры приведена в [3]. Для задания температуры, солёности и скорости в устьях рек и проливах использовались литературные данные [8]. В расчете задавалось, что в верхнебосфорском течении температура и солёность та же, что и в море. В нижнебосфорском потоке солёность принималась равной 22‰ и температура – 16°C, что соответствует характеристикам вод Мраморного моря.

Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена импульсом и горизонтальной турбулентной диффузии тепла и соли выбирались следующими:

$$v_H = 10^{16} \text{ см}^4/\text{с}, \quad \kappa^H = 5 \times 10^{14} \text{ см}^4/\text{с}.$$

Коэффициенты турбулентности по вертикали вычислялись на основе теории Меллора-Ямады 2.5 [9].

Результаты. В результате численного эксперимента были получены поля термогидродинамических характеристик Черного моря на каждые сутки периода интегрирования. Анализ поля скорости показал, что для вихрей синоптических масштабов, таких как Севастопольский и Батумский антициклоны, модель хорошо воспроизводит известные особенности динамики, полученные в ранних работах и подтвержденные натурными наблюдениями [2, 3]. Продолжением этих работ являются расчеты с высоким разрешением, которые позволяют исследовать мезомасштабную изменчивость циркуляции вод.

Рассмотрим отдельные районы черноморского бассейна. Поля скорости на верхнем расчетном горизонте, характерные для этих областей, представлены на рис. 1. Наиболее интенсивное образование вихрей с масштабами порядка десятков километров происходит около Кавказского (см. рис. 1, *а*) и Анатолийского (см. рис. 1, *б*) побережий. Видно, что круговороты, формирующиеся в этих районах, имеют антициклонический знак завихренности (см. рис. 1, *а, б*); они возникают квазипериодически и переносятся ОЧТ по направлению движения. Основная причина такой динамики

¹ ALADIN – Aire Limitee Adaptation dynamique Development InterNational.

² SST – Sea Surface Temperature.

³ NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (Национальное управление океанических и атмосферных исследований), а также – название космических аппаратов космической метеорологической системы NOAA.

ки здесь – это взаимодействие Основного Черноморского течения (ОЧТ) с орографией берега. Время жизни этих антициклонов составляет 15 – 40 дней, в среднем скорость течений здесь равна 30 – 35 см/с, а по периферии вихрей в зоне взаимодействия с ОЧТ скорости возрастают до 50 см/с. Возле побережья Кавказа вихри наблюдаются до глубин около 100 м, возле Турции – структура вихрей прослеживается до глубин 300 м.

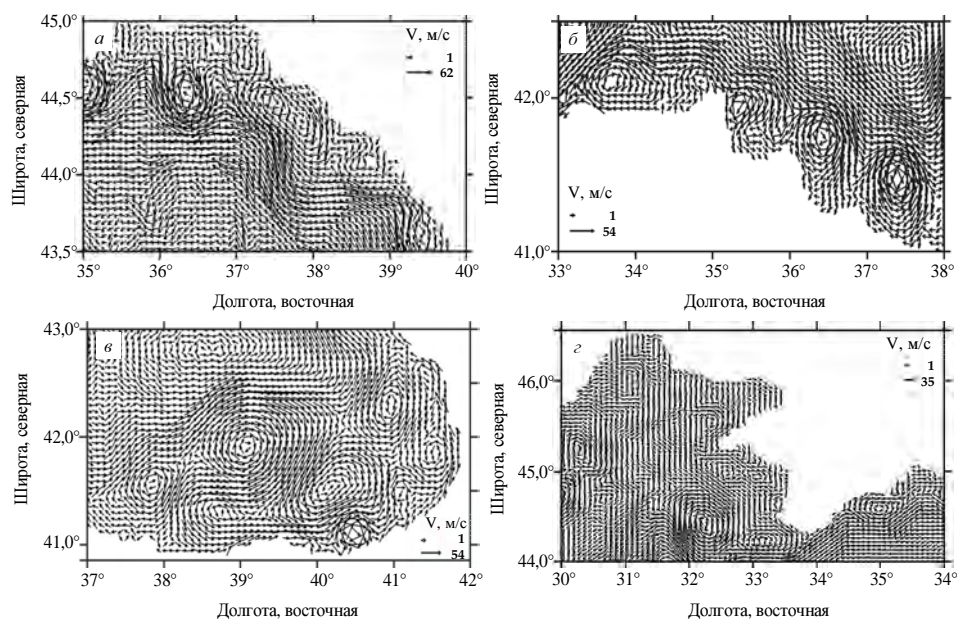


Рис. 1. Поле скорости на верхнем расчетном горизонте возле побережья Кавказа 11.04.06 (а), возле побережья Турции 14.08.06 (б), в юго-восточной части моря 18.09.06 (в) и на СЗШ 07.08.06 (з).

Перемещаясь по направлению ОЧТ, мезомасштабные вихри, возникающие у побережья Турции, оказывают влияние на Батумский антициклон. К концу лета – началу осени взаимодействие сдвигающимися с запада вихрями приводит к тому, что Батумский антициклон уменьшается в размерах, а справа от него формируется на множество мезомасштабных вихрей различного размера и знака завихренности (см. рис. 1, в). Мелкие образования располагаются у берега и наблюдаются до 100 м, более крупные вихри – до 300 м.

Анализ результатов представленного эксперимента показал, что в поле скорости воспроизводятся вихревые образования с пространственными масштабами до десяти километров и временными до нескольких суток. В основном эти субмезомасштабные вихри располагаются на северо-западном шельфе и вдоль северного побережья Черного моря (см. рис. 1, з). Скорости в них составляют 5 – 7 см/с, время жизни не превышает 3 суток. На северо-западном шельфе (СЗШ) структура вихрей прослеживается до глубин 25 м. У южного и юго-восточного побережья Крыма мезомасштабные и субмезомасштабные вихри со скоростями 10 – 15 см/с наблюдаются до глубин 80 м. Повышение скоростей по сравнению с подобными образованиями на СЗШ обусловлено влиянием струи ОЧТ.

Энергетический анализ. Вывод и свойства дискретных уравнений бюджета кинетической и потенциальной энергии, соответствующих постановке [3] представлены в работе [10]. Запишем в символьном виде уравнение скорости изменения кинетической энергии:

$$E_t + Adv(P + E) = \Pi \leftrightarrow E + F_{bfr}^{\tau}(E) - Diss_{ver}(E) - Diss_{hor}(E) + D_{fic}(E). \quad (1)$$

После интегрирования (1) по вертикали имеем

$$\begin{aligned} \langle E_t \rangle^H - \zeta_t E_0 + g \left(\frac{\zeta^2}{2} \right)_t + Adv_{hor}(P + E) = \langle \Pi \leftrightarrow E \rangle^H + \\ + \tau \rightarrow E - \langle Diss_{bfr}(E) \rangle^H - \langle Diss_{ver}(E) \rangle^H - \\ - \langle Diss_{hor}(E) \rangle^H + \langle D_{fic}(E) \rangle^H. \end{aligned} \quad (2)$$

Интегрирование по горизонтали дает

$$\begin{aligned} \langle E_t \rangle_V - \langle \zeta_t E_0 - g \left(\frac{\zeta^2}{2} \right)_t \rangle_S = \langle \Pi \leftrightarrow E \rangle_V + \langle \tau \rightarrow E \rangle_S - \\ - \langle Diss_{bfr}(E) \rangle_S - \langle Diss_{ver}(E) \rangle_V - \langle Diss_{hor}(E) \rangle_V. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение скорости изменения потенциальной энергии имеет вид:

$$\begin{aligned} \Pi_t + Adv(\Pi) = -\Pi \leftrightarrow E + Diff_{hor}(\Pi) + Diff_{ver}(\Pi) + \\ + Diff_{ver}^{bot-sur}(\Pi) + Diff_{ver}^{\kappa^V}(\Pi) + Diff_{ver}^{add}(\Pi). \end{aligned} \quad (4)$$

После интегрирования (4) по вертикали и по горизонтали получаем соответственно:

$$\begin{aligned} \langle \Pi_t \rangle^H + Adv_{hor}(\Pi) = -\langle \Pi \leftrightarrow E \rangle^H + \langle Diff_{hor}(\Pi) \rangle^H + \\ + \langle Diff_{ver}^{bot-sur}(\Pi) \rangle^H + \langle Diff_{ver}^{\kappa^V}(\Pi) \rangle^H + \langle Diff_{ver}^{add}(\Pi) \rangle^H, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \langle \Pi_t \rangle_V = -\langle \Pi \leftrightarrow E \rangle_V + \langle Fluxes \rangle_S + \langle Diff_{hor}(\Pi) \rangle_V + \\ + \langle Diff_{ver}^{bot-sur}(\Pi) \rangle_V + \langle Diff_{ver}^{\kappa^V}(\Pi) \rangle_V + \langle Diff_{ver}^{add}(\Pi) \rangle_V. \end{aligned} \quad (6)$$

Все символьные обозначения в (1) – (6) аналогичны [10].

Далее будут приведены некоторые результаты обработки численного эксперимента на основе энергетического анализа для летнего периода. Этот интервал выбран потому, что в течение июля-сентября в эксперименте наблюдалась наиболее интенсивная мезомасштабная изменчивость. На рис. 2 представлено изменение со временем проинтегрированных по объему энергетических слагаемых в уравнении бюджета кинетической энергии (3). По оси времени указаны модельные сутки, которые соотносятся с реальными следующим образом: 5295 – 01.07.06, 5326 – 01.08.06, 5357 – 01.09.06.

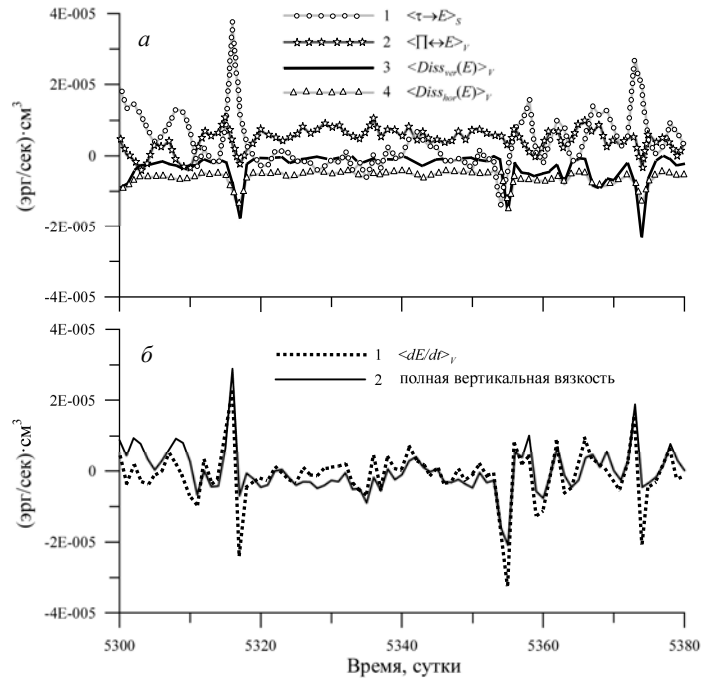


Рис. 2. Изменение со временем слагаемых в уравнении (3).

Анализ касательных напряжений трения ветра показал, что летом 2006 г. ветровая активность над Черным морем ослабевает, в то же время наблюдается сильная изменчивость в поле слабых ветров. В июле основной вклад в кинетическую энергию идет за счет притока от ветра (см. рис. 2, а, кривая 1), который достигает максимального значения 22.07.06. После этого приток от ветра ослабевает и начинает преобладать вклад, вносимый работой силы плавучести (см. рис. 2, а, кривая 2). До конца лета слагаемое $\langle \Pi \leftrightarrow E \rangle_V$ положительно, т.е. доступная потенциальная энергия переходит в кинетическую. Если сравнить кривые 1 и 2, изображенные на рис. 2, а, видно что в моменты, когда $\langle \tau \rightarrow E \rangle_S$ достигает пиковых значений, величина $\langle \Pi \leftrightarrow E \rangle_V$ уменьшается. В сентябре наблюдается сильная изменчивость притока от ветра и работы силы плавучести. Потеря энергии происходит за счет вертикального и горизонтального внутреннего трения (см. рис. 2, а, кривые 3, 4), причем, чем сильнее изменчивость притока от ветра (см. рис. 2, а, кривая 1), тем сильнее вертикальная диссипация кинетической энергии (рис. 2, а, кривая 3). Сумма второго, третьего и четвертого слагаемых в правой части (3) дает полную вертикальную вязкость.

Из рис. 2, б видно, что изменение кинетической энергии (см. рис. 2, б, кривая 1) со временем происходит за счет изменения полной вертикальной вязкости (см. рис. 2, б, кривая 2), куда основной вклад вносит приток от ветра.

На рис. 3 представлены приток и перераспределение потенциальной энергии, которые определяются слагаемыми в (6). Основной вклад в перемешивание по вертикали вносит слагаемое, характеризующее разность

плотности на поверхности и у дна моря (см. рис. 3, кривая 1). Оно балансируется слагаемым, зависящим от изменения коэффициента диффузии с глубиной (см. рис. 3, кривая 2). Изменение потенциальной энергии за счет потоков тепла и соли на поверхности $\langle Fluxes \rangle_S$ и слагаемого, возникшего как результат нелинейности уравнения состояния $\langle Diff_{ver}^{add}(II) \rangle_V$, незначительно. Со второй половины августа наблюдается сильная изменчивость полной вертикальной диффузии (см. рис. 3, кривая 3).

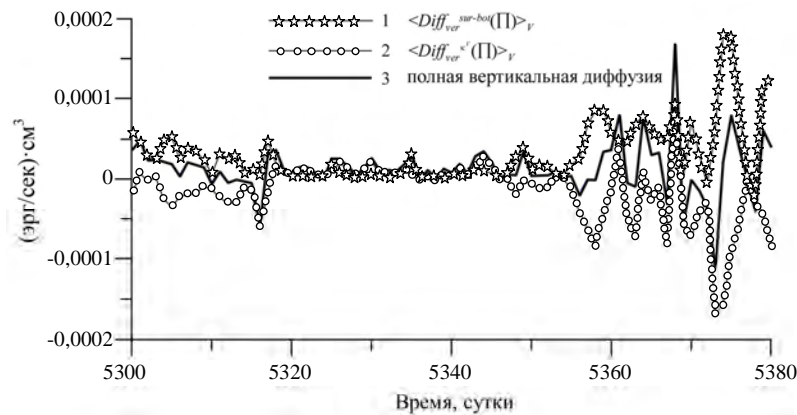


Рис. 3. Изменение со временем слагаемых в уравнении (6).

Если сравнить между собой кривую 1 на рис. 2, *a* и кривую 2 на рис. 3 видно, что сильная изменчивость в поле ветра соответствует значительным изменениям слагаемого, учитывающего изменение потенциальной энергии за счет неоднородности вертикального коэффициента диффузии по глубине. Таким образом, анализ проинтегрированных по объему энергетических слагаемых показал, что сильная изменчивость в поле слабого ветра приводит к значительным колебаниям как полной вертикальной вязкости (см. рис. 2, *b*, кривая 2), так и полной вертикальной диффузии (см. рис. 3, кривая 3). Логично предположить, что этот факт объясняется непосредственным учетом касательных напряжений трения ветра в параметризации Меллора-Ямады. Т.е. применение этой теории позволяет более детально описать изменение полной энергии в системе.

Были исследованы осредненные за лето проинтегрированные по вертикали энергетические потоки в (2), (5). Выявлено, что в среднем за лето основной вклад дают адвективные слагаемые (третий член в левой части (2), второй член в левой части (5)) и работа силы плавучести (первое слагаемое правой части (2)). Остальные слагаемые не дают значительного вклада в изменение энергии.

На рис. 4 представлены пространственные распределения проинтегрированных по вертикали энергетических потоков: адвекции кинетической энергии (см. рис. 4, *a*), адвекции давления течениями (см. рис. 4, *b*), работы силы плавучести (см. рис. 4, *в*) и адвекции потенциальной энергии (см. рис. 4, *г*). Видно, что наиболее активная энергетическая зона – это юго-восточная часть моря, где наблюдается сильная изменчивость всех представленных слагаемых, причем $Adv_{hor}(E)$ и $Adv_{hor}(P)$ здесь взаимно

компенсируются. Область по периферии ОЧТ характеризуется интенсивной работой силы давления (см. рис. 4, б) и силы плавучести (см. рис. 4, в). Следует отметить, что основной циклонический круговорот является областью, где вклад в кинетическую энергию за счет доступной потенциальной максимален и превышает остальные слагаемые более чем в 5 раз. Отрицательные значения $\langle \Pi \leftrightarrow E \rangle^H$ наблюдаются в районах Севастопольского и Батумского антициклонов, у побережья Анатолии и Кавказа (см. рис. 4, в), т.е. в этих областях преобладают процессы бароклинной неустойчивости. Для $Adv_{hor}(\Pi)$ наблюдается сильная изменчивость в глубоководной части моря (см. рис. 4, з): в центральной части моря преобладают положительные значения, в области Батумского антициклона наблюдается обширная зона отрицательной величины $Adv_{hor}(\Pi)$. Для всех осредненных за лето проинтегрированных по вертикали энергетических потоков в (2), (5) характерна слабая изменчивость в мелководных районах моря.

Также был рассмотрен вклад мгновенных значений слагаемых в уравнениях бюджета кинетической (1) и потенциальной (4) энергий для случая субмезомасштабной изменчивости. На рис. 5 приведены поля скорости 07.08.06 в районе СЗШ на горизонтах 3 и 25 м, и соответствующие им энергетические потоки. Анализ карт пространственных распределений мгновенных потоков показал, что там, где наблюдаются субмезомасштабные вихри (см. рис. 5, а), работа силы плавучести отрицательна (см. рис. 5, б), т.е. преобладают процессы бароклинной неустойчивости. На горизонте 25 м представляет интерес пространственное распределение $Diff_{ver}^{K^V}(\Pi)$. Если на поверхности это слагаемое было мало и однородно, то на 25 м заметно четкое соответствие зон повышения величины слагаемого определяющего изменение потенциальной энергии за счет неоднородности коэффициента диффузии по вертикали (см. рис. 5, з) с зонами существования субмезомасштабных вихрей (см. рис. 5, в).

Выводы. В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы. Увеличение горизонтального разрешения модели позволяет воспроизводить мезо- и субмезомасштабную динамику вод. Основные зоны моря, где возникают мезомасштабные вихри, это побережье Кавказа, северо-восточное побережье Турции, юго-восточная часть и северо-западный шельф Черного моря. Анализ поля скорости показал, что для 2006 г. наиболее интенсивное вихреобразование наблюдается с июля по сентябрь. Вихри пространственных масштабов порядка нескольких километров и временем жизни нескольких суток возникают на северо-западном шельфе и вдоль северного побережья Черного моря.

Анализ интегральной энергетики за летний период показал следующее. При отсутствии интенсивной ветровой активности основной вклад в кинетическую энергию дает работа силы плавучести. Увеличение притока от ветра вызывает уменьшение вклада за счет доступной потенциальной энергии, и в это же время $\langle \Pi \leftrightarrow E \rangle_V$ компенсируется горизонтальной диссипацией кинетической энергии.

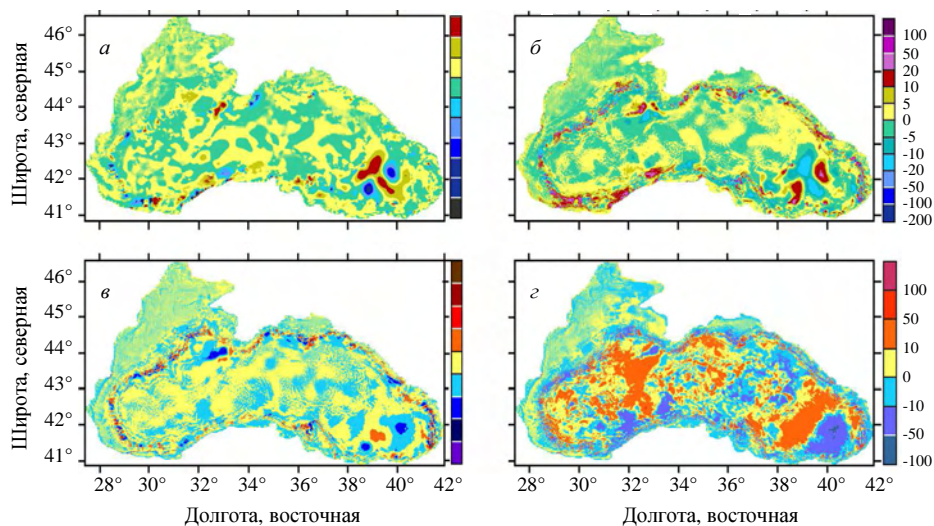


Рис. 4. Осредненные за лето энергетические потоки (эрг/см²) в (2), (5):
 $a - Adv_{hor}(E)$; $b - Adv_{hor}(P)$; $v - \langle P \leftrightarrow E \rangle^H$; $z - Adv_{hor}(\Pi)$.

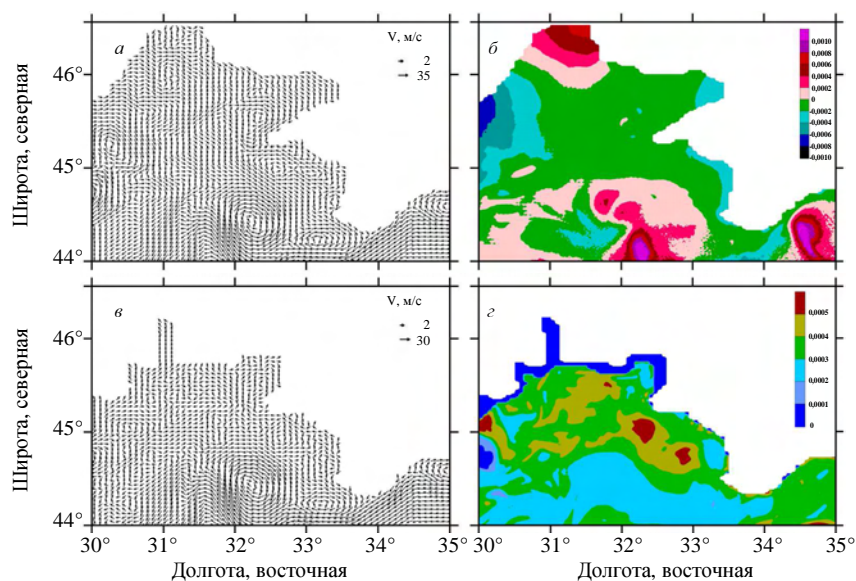


Рис. 5. Поля скорости 07.08.06 на СЗШ на горизонте 3 м (а) и 25 м (в);
 $P \leftrightarrow E$ на горизонте 3 м (б), $Diff_{ver}^{K^V}(\Pi)$ на горизонте 25 м (з).

Приток энергии от ветра компенсируется вертикальным трением. Основной вклад в перемешивание по вертикали вносит слагаемое, характеризующее разность плотности на поверхности и у дна моря, которое балансируется слагаемым, зависящим от изменения коэффициента диффузии с глубиной.

В среднем за лето наиболее интенсивный энергообмен наблюдается в зоне Батумского антициклона, здесь преобладают процессы бароклинной неустойчивости, адвекция кинетической энергии компенсируется работой силы давления. По периферии ОЧТ преобладающим является приток в кинетическую энергию за счет доступной потенциальной. В районах, характеризующихся интенсивной мезомасштабной изменчивостью, работа силы плавучести отрицательна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баянкина Т.М., Иванчик М.В., Кубряков А.И., Ратнер Ю.Б., Холод А.Л., Воронина Н.Н., Плотников Е.В.* Структура и результаты опытной эксплуатации многокомпонентной системы диагноза и прогноза динамики Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: сборник научных трудов. – Севастополь.: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2009. – Вып. 19. – С. 182-188.
2. *Демьшев С.Г., Дымова О.А.* Результаты прогностического расчета гидрофизических полей Черного моря с высоким пространственным разрешением // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: сборник научных трудов. – Севастополь.: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2010. – Вып. 22. – С. 22-30.
3. *Демьшев С.Г., Дымова О.А.* Моделирование гидрофизических полей Черного моря в январе-сентябре 2006 года с высоким пространственным разрешением с использованием параметризации Меллора-Ямады // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 5. – С. 59-69.
4. *Полонский А.Б., Джиганшин Г.Ф.* Структура и мезомасштабная изменчивость Основного Черноморского течения у побережья Крыма // Доповіді Національної Академії наук України. – 2010. – № 6. – С. 107-112.
5. *Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О., Куклева О.Н., Соловьев Д.М.* Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // Океанология. – 2012. – Том 52, № 5. – С. 629-642.
6. *Кортаев Г.К., Еремеев В.Н.* Введение в оперативную океанографию Черного моря. – Севастополь.: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2006. – 382 с.
7. *Дорофеев В.Л., Кортаев Г. К., Ратнер Ю.Б.* Система мониторинга гидрофизических полей Черного моря в квазиоперативном режиме // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь.: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика» – 2006. – С.150-158.
8. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Выпуск 1.* Гидрометеорологические условия. – Л.: Гидрометеиздат. – 1991. – 428 с.
9. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – Vol. 20, №4. – P. 851-875.
10. *Демьшев С.Г.* Энергетика климатической циркуляции Черного моря. Ч.I. Дискретные уравнения скорости изменения кинетической и потенциальной энергий // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 9. – С. 65-80.

Материал поступил в редакцию 17.10.2012 г.

АНОТАЦІЯ В роботі представлені результати чисельного прогностичного експерименту по моделюванню гідрофізичних полів Чорного моря в січні-вересні 2006 р. Приведені особливості мезомасштабної та субмезомасштабної динаміки вод для окремих районів моря. Досліджені можливі фізичні механізми формування мезо- та субмезомасштабних вихорів на основі енергетичного аналізу. Показано, що літом 2006 р. інтенсивний енергообмін спостерігається у зоні Батумського антициклону. За відсутності значної вітрової активності основний вклад в кінетичну енергію дає робота сили плавучості. Неоднорідність у полі слабого вітру приводить до істотних змін повній вертикальній в'язкості та повній вертикальній дифузії.

ABSTRACT The results of numerical prognostic experiment for the Black Sea hydrophysical fields modeling in January – September 2006 are presented in this work. Mesoscale and submesoscale dynamic features for the some domain are achieved. Possible physical mechanisms of the mesoscale and submesoscale eddies generation are studied by energy analyses. It's shown that the intensive energy exchange are observed at Batumi anticyclone area in summer 2006. Basic contribution to kinetic energy gives work of the buoyancy force if significant wind activity is absent. Heterogeneity in the light wind field results to major modification of full vertical viscosity and full vertical diffusion.