

Влияние формы бассейна на формирование циркуляции в Черном море

© 2016 А.А. Павлушин, Н.Б. Шапиро, Э.Н. Михайлова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

E-mail: pavlushin@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 25.12.2015 г. После доработки 21.01.2016 г.

Приводятся результаты численного моделирования ветровой циркуляции в бассейнах различной конфигурации с горизонтальным дном без учета β -эффекта. Данная работа является продолжением серии экспериментов по численному моделированию процессов формирования гидрофизических полей в Черном море с помощью двухслойной вихререзающей модели. В качестве внешнего воздействия используется стационарный циклонический ветер. Показано, что в вытянутых бассейнах крупномасштабная циркуляция, возникающая за счет завихренности ветра, разделяется на нескольких суббассейновых круговоротов, которые стремятся принять форму кругов, вписанных в геометрию бассейна. Количество таких круговоротов зависит от соотношения длины бассейна и его ширины: чем более вытянут бассейн, тем больше вихрей возникает. На процессы формирования поля течений в бассейне влияют также особенности береговой линии. С помощью экспериментов подтверждено, что образование в Черном море двух отдельных циклонических вихрей, известных как «очки Книпповича», обусловлено вытянутой формой бассейна и влиянием выступающей части Анатолийского п-ова.

Ключевые слова: Черное море, вихререзающая модель, численный эксперимент, гидродинамическая неустойчивость течений, форма бассейна.

Введение. Целью настоящей работы является исследование влияния формы бассейна и особенностей береговой линии на циркуляцию в Черном море. В частности, представляют интерес причины формирования особенности крупномасштабной циркуляции, известной как «очки Книпповича».

Для исследования этого вопроса была использована двухслойная вихререзающая модель, подробно описанная в работе [1]. Эта модель аналогична модели Холланда – Лина для океанической циркуляции [2]. Движение в бассейне генерируется ветром, сток энергии осуществляется за счет горизонтальной турбулентной вязкости и придонного трения. Уравнения модели – «примитивные» уравнения движения и неразрывности, проинтегрированные в пределах каждого слоя:

$$(U_1)_t + (u_1 U_1)_x + (v_1 U_1)_y - fV_1 = gh_1 \zeta_x + \tau^x - R_a^x + A_l \nabla (h_1 \nabla u_1),$$

$$(V_1)_t + (u_1 V_1)_x + (v_1 V_1)_y + fU_1 = gh_1 \zeta_y + \tau^y - R_a^y + A_l \nabla (h_1 \nabla v_1),$$

$$(U_2)_t + (u_2 U_2)_x + (v_2 U_2)_y - fV_2 = gh_2 \zeta_x + g'h_2 (h_1)_x + R_a^x - R_b^x + A_l \nabla (h_2 \nabla u_2),$$

$$(V_2)_t + (u_2 V_2)_x + (v_2 V_2)_y + fU_2 = gh_2 \zeta_y + g'h_2 (h_1)_y + R_a^y - R_b^y + A_l \nabla (h_2 \nabla v_2),$$

$$(h_1)_t + (U_1)_x + (V_1)_y = 0,$$

$$(h_2)_t + (U_2)_x + (V_2)_y = 0,$$

где индексы 1 и 2 указывают на верхний и нижний слой соответственно; нижние индексы x, y, t означают дифференцирование; u_i, v_i – горизонтальные компоненты скорости течений в i -м слое; h_1, h_2 – толщины слоев; $U_i = u_i h_i$, $V_i = v_i h_i$ – компоненты потоков; $R_a^x = r_a(u_1 - u_2)$, $R_a^y = r_a(v_1 - v_2)$ – компоненты силы трения между слоями; $R_b^x = r_b u_2$, $R_b^y = r_b v_2$ – компоненты силы придонного трения; r_a, r_b – постоянные коэффициенты; $f = f_0 + \beta y$ – параметр Кориолиса, $f_0 = 10^{-4}$ 1/с, $\beta = 2 \cdot 10^{-13}$ 1/(см·с); $g = 980$ г·см/с² – ускорение свободного падения; $g' = g(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$; τ^x, τ^y – компоненты тангенциального напряжения ветра; A_t – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости.

Для замыкания уравнений используется интегральное уравнение неразрывности в приближении «твердой крышки», которое позволяет ввести функцию тока ψ для полных потоков:

$$U_1 + U_2 = -\psi_y, \quad V_1 + V_2 = \psi_x.$$

На боковых границах используются условия прилипания. Сток рек в море и водообмен через проливы не учитываются. В начальный момент времени жидкость находится в состоянии покоя, поверхность раздела и поверхность моря горизонтальны.

Для конечно-разностного представления модели используется численная схема, основанная на бокс-методе с сеткой B по терминологии Аракавы, двухслойной схеме интегрирования по времени, неявной аппроксимации силы Кориолиса и сил трения на поверхности раздела и дне. Адвективные члены в уравнениях неразрывности аппроксимируются схемой первого порядка точности (направленными разностями), а в уравнениях движения – схемой второго порядка точности (Лакса – Вендроффа). Наличие схемной вязкости в уравнениях неразрывности обеспечивает устойчивость численной схемы и положительность толщин слоев.

В численных экспериментах, описанных в работе [1], расчеты проводились на прямоугольной сетке 4×3 км с шагом по времени 0,1 ч. Тангенциальное напряжение ветра τ (рис. 1) задавалось стационарным и с постоянной завихренностью ($0,5 \cdot 10^{-7}$ Н/м³). Значения τ^x, τ^y на границах области интегрирования равнялись $1 \text{ см}^2/\text{с}^2$, максимальные значения τ над морем соответствовали скорости ветра ~ 8 м/с. Рассматривалась также реальная конфигурация бассейна Черного моря, а рельеф дна, β -эффект и трение на границе раздела слоев не учитывались. Было показано, что в результате ветрового воздействия со временем в море формируется циркуляция, состоящая из двух суббассейновых циклонов, на периферии которых за счет бароклинной неустойчивости образуются мезомасштабные антициклоны. На рис. 2 приведены

мгновенные (рис. 2, а, в) и осредненные (рис 2, б, г) по времени поля толщины h_1 (рис. 2, а, б) и течений (рис. 2, в, г) в верхнем слое. Отметим, что в осредненной по времени циркуляции мезомасштабные антициклоны не проявляются.

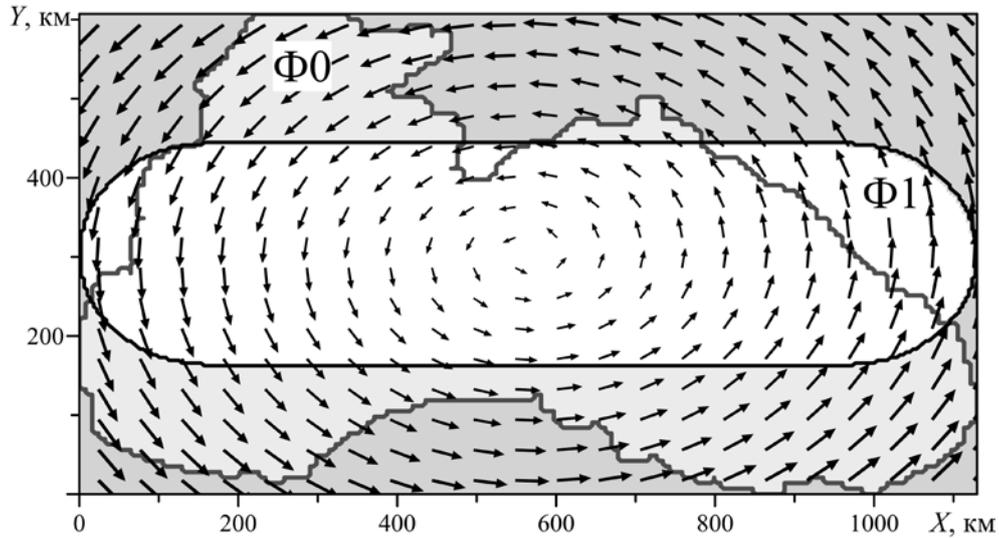


Рис. 1. Поле тангенциального напряжения ветра и формы бассейнов в экспериментах Φ_0 и Φ_1

В нижнем слое возникала циркуляция, сходная с циркуляцией в верхнем слое [1]. Скорости течений в нижнем слое были меньше, чем в верхнем (средние по площади значения составили ~ 17 см/с, максимальные – до 45 см/с). В верхнем слое максимальные скорости достигали 100 см/с, средние ~ 30 см/с.

При сопоставлении между собой полей различных характеристик оказалось, что в верхнем слое распределение толщины хорошо коррелирует с полем течений, а интегральная функция тока отражает течения в нижнем слое. Поэтому для визуализации циркуляционных процессов можно использовать вместо векторных полей течений распределение h_1 для верхнего слоя и ψ – для нижнего.

Кроме мгновенных и осредненных полей характеристик анализировались графики изменения во времени осредненных по площади кинетической и доступной потенциальной энергии (рис. 2, д), которые определялись следующим образом:

$$KE_1 = \langle \rho_1 h_1 (u_1^2 + v_1^2) / 2 \rangle, \quad KE_2 = \langle \rho_2 h_2 (u_2^2 + v_2^2) / 2 \rangle, \quad DPE = \langle \rho_1 g' (h_1 - h_0)^2 / 2 \rangle,$$

где KE_1 – кинетическая энергия верхнего слоя; KE_2 – кинетическая энергия нижнего слоя; DPE – доступная потенциальная энергия; ρ_1, ρ_2 – плотность воды в верхнем и нижнем слоях. Угловые скобки означают осреднение по площади.

На указанных графиках энергии наблюдались колебания с различной частотой и амплитудой, которые связаны с работой тангенциального напря-

жения ветра (рис. 2, *e*), определяемой как $W_\tau = \langle \rho_1 (u_1 \tau^x + v_1 \tau^y) \rangle$. При стационарном внешнем воздействии такие колебания носят автоколебательный характер [3].

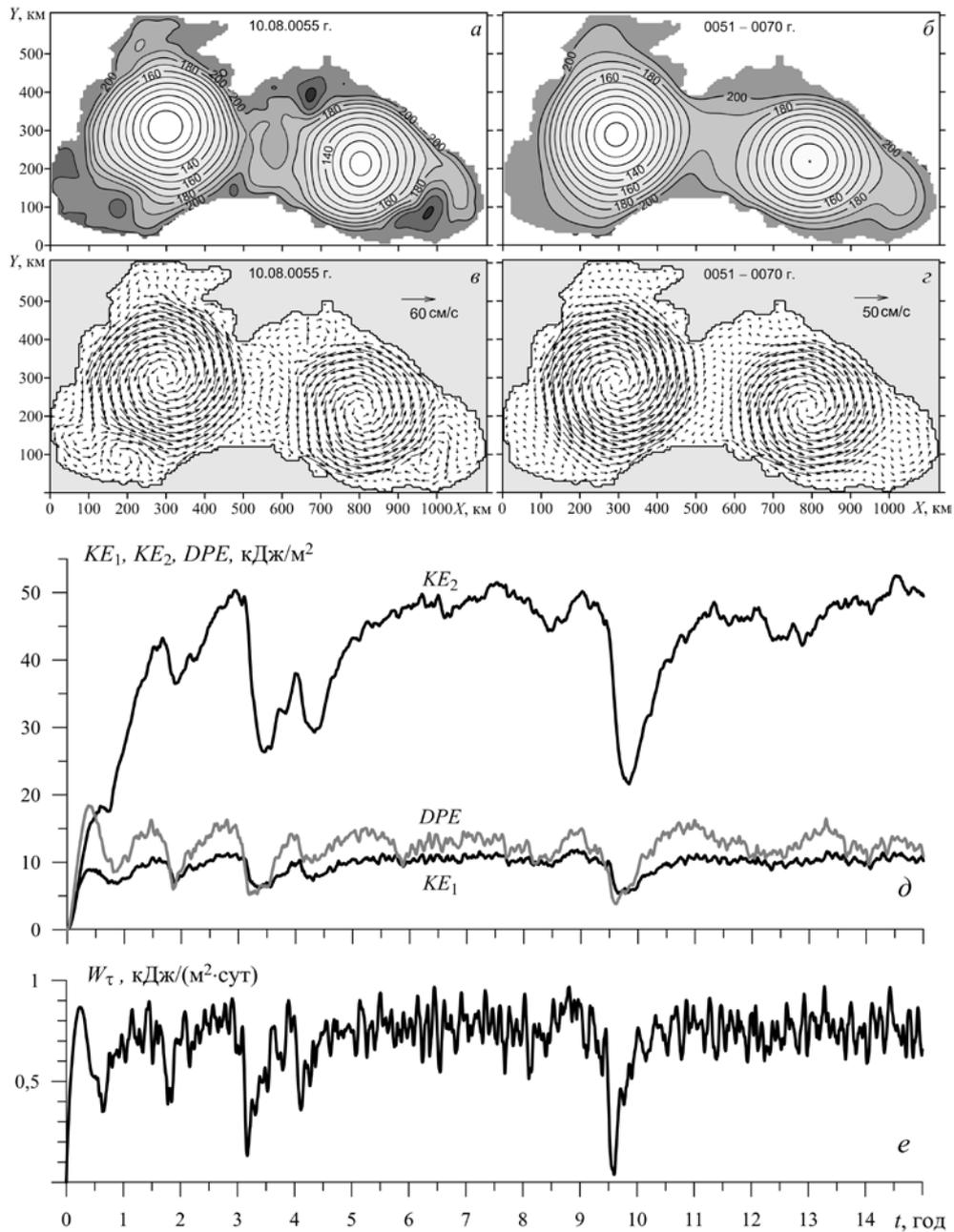


Рис. 2. Результаты расчетов в эксперименте Ф0 с реальной конфигурацией Черного моря: мгновенная (*a*) и осредненная за 20 лет (*б*) толщина верхнего слоя h_1 , м; мгновенное (*в*) и осредненное за 20 лет (*г*) поле течений в верхнем слое; средние по площади составляющие энергии (*д*) и работа тангенциального напряжения ветра W_τ (*е*)

Численные эксперименты. Для удобства дальнейшего описания введем обозначения для отдельных экспериментов. Рассмотренный выше эксперимент с реальной конфигурацией Черного моря обозначим $\Phi 0$. Новый эксперимент, в котором использовался вытянутый бассейн (рис. 1), назовем $\Phi 1$. Он проводился с целью сравнения его результатов с результатами эксперимента $\Phi 0$. Все параметры модели, кроме формы бассейна, были оставлены прежними, а именно: глубина бассейна $H = 2200$ м; в начальный момент времени толщина верхнего слоя задавалась равной 175 м; коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости $A_l = 10^5$ см²/с; коэффициент придонного трения $r_b = 0,007$ см/с; трение между слоями не учитывалось ($r_a = 0$). Использовалось то же поле ветра (рис. 1).

В эксперименте $\Phi 1$ через три года модель выходит на устойчивый автоколебательный режим с периодом колебаний ~ 50 сут. Это хорошо видно на графиках составляющих энергии и работы тангенциального напряжения ветра (рис. 3, а, б), которые отличаются от аналогичных графиков в эксперименте $\Phi 0$ (рис. 2, д, е).

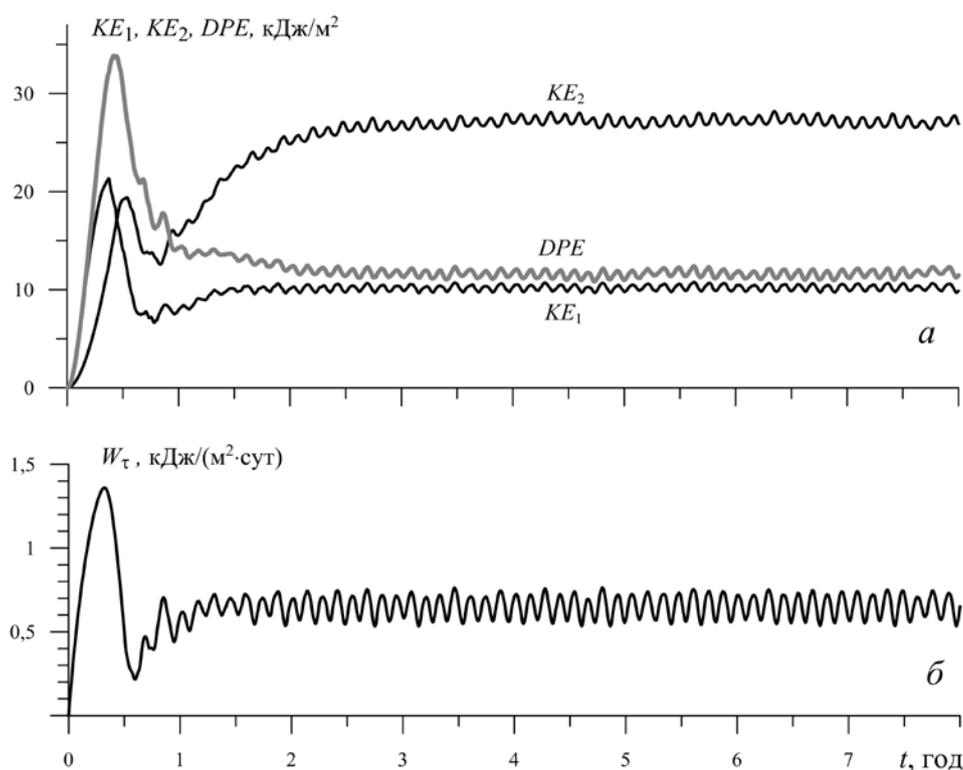


Рис. 3. Графики изменения во времени составляющих энергии KE_1 , KE_2 , DPE (а) и работы тангенциального напряжения ветра W_τ (б) в эксперименте $\Phi 1$

На рис. 3 четко выделяются три последовательных периода формирования циркуляции – *spin-up*, адаптации и статистического равновесия. Продолжительность периода *spin-up* составляет ~ 5 мес. Значения DPE и KE_1 монотонно растут и достигают максимума к концу первого периода, KE_2 также растет, но менее интенсивно, чем KE_1 и DPE . Рост энергии происходит за

счет увеличения W_τ . В конце периода *spin-up* W_τ максимальна. Этот период заканчивается, когда в результате гидродинамической неустойчивости крупномасштабных течений начинают образовываться мезомасштабные вихри противоположной ветру завихренности, вследствие чего меняется поле течений и начинает уменьшаться W_τ .

В начале периода адаптации из-за уменьшения W_τ падают значения DPE и KE_1 . Что касается KE_2 , то несколько месяцев она продолжает свой первоначальный рост, но затем тоже начинает уменьшаться (рис. 3, *a*). Рост KE_2 в начале периода, очевидно, связан с тем, что в кинетическую энергию нижнего слоя переходит часть доступной потенциальной энергии. После достижения минимума примерно на седьмом месяце W_τ снова начинает расти, по этой причине возобновляется поступление в систему энергии, которая идет на увеличение KE_1 и KE_2 . На рост W_τ накладываются колебания, которые затем проявляются и в поведении составляющих энергии. Окончанием периода адаптации считается момент, когда все энергетические характеристики модели выходят на статистически равновесный практически периодический режим, который сохраняется до конца расчетов. В рассматриваемом эксперименте период адаптации заканчивается примерно в конце третьего года.

В статистически равновесном режиме графики DPE , KE_1 , KE_2 , W_τ имеют четко выраженный колебательный характер, причем амплитуды и частота колебаний практически стационарны в отличие от эксперимента Ф0 с реальной конфигурацией Черного моря (рис. 2, *d*, *e*). Реальная форма бассейна и неровная береговая линия способствуют возникновению большего числа мезомасштабных вихрей, которые, взаимодействуя друг с другом и с крупномасштабными течениями, искажают «идеальную» картину, наблюдаемую в эксперименте Ф1. Средние значения KE_1 и DPE в этих экспериментах примерно равны, KE_2 в эксперименте Ф0 больше, чем в Ф1.

Если сравнить колебания на графиках рис. 3, то можно заметить, что W_τ , DPE , KE_1 находятся в одной фазе, а KE_2 – в противофазе к ним. Скорее всего, это связано с особенностями передачи энергии в нижний слой, когда DPE переходит в KE_2 посредством мезомасштабных вихрей, образующихся вследствие гидродинамической неустойчивости течений. Причиной колебаний является изменение притока энергии в систему за счет W_τ (рис. 3, *b*), которая зависит от взаимного расположения векторных полей ветра и течений в верхнем слое. Этот процесс имеет автоколебательный характер.

На рис. 4, где приведены несколько последовательных распределений толщины верхнего слоя в пределах одного периода колебаний, видно, как меняется интенсивность циклонов и антициклонов. В момент времени, когда W_τ имеет максимум (рис. 4, *a*), в бассейне существуют три циклона, наиболее интенсивный из которых расположен в его середине. Возле северной и южной границ бассейна между циклонами формируются антициклонические вихри, которые перемещаются от берега к центру (рис. 4, *b*). При минимальных значениях W_τ антициклонические вихри между циклонами располагаются ближе к средней оси бассейна (рис. 4, *в*). Уменьшение притока энергии в систему приводит к ослаблению и исчезновению антициклонических вихрей (рис. 4, *г*). Далее опять начинается рост W_τ и колебательная система приходит в начальное состояние (рис. 4, *д*).

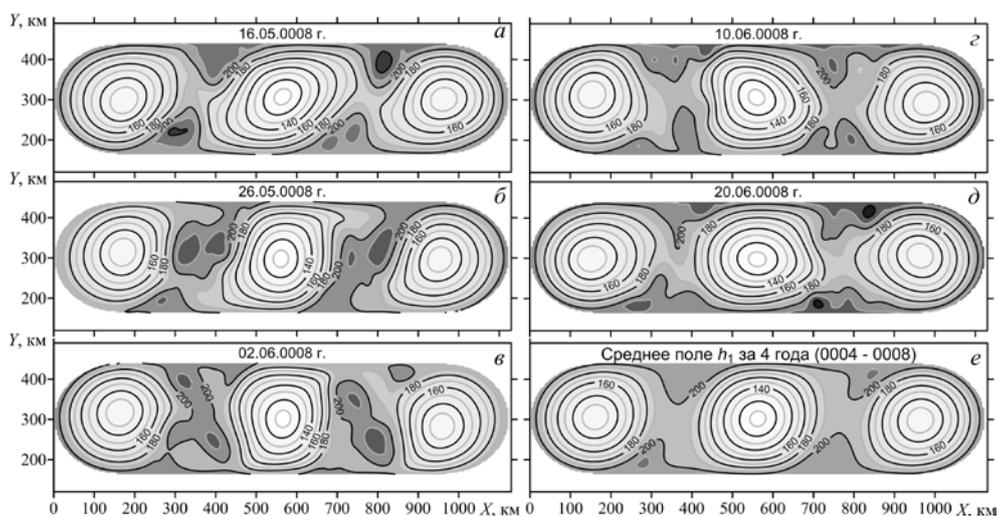


Рис. 4. Толщина верхнего слоя h_1 (м) для различных моментов времени в эксперименте Ф1 (области с большими значениями толщины слоя обозначены более темным цветом)

На рис. 4, *e* приведено распределение толщины верхнего слоя h_1 , осредненной за весь период статистического равновесия. Видно, что в осредненном поле присутствуют три суббассейновых циклонических вихря, а мезомасштабные антициклонические вихри практически отсутствуют.

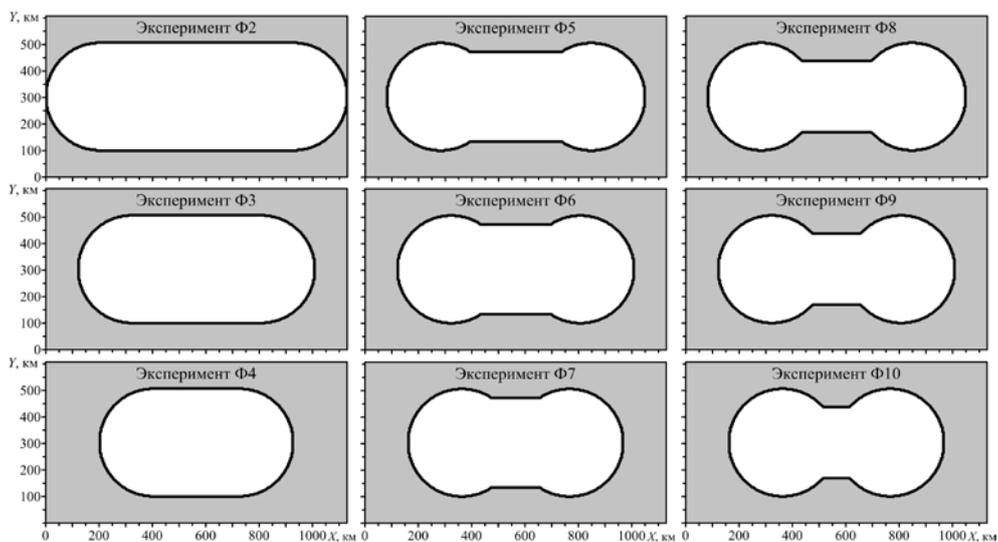


Рис. 5. Формы бассейнов в экспериментах Ф2 – Ф10

Таким образом, в эксперименте Ф1, так же как и в эксперименте с реальной конфигурацией Ф0, крупномасштабная циклоническая циркуляция разделилась на несколько круговоротов, каждый из которых стремился обрести округлую форму, максимально возможную в заданных границах бассейна. Отли-

чие состоит в количестве образовавшихся циклонических вихрей, а также в количестве и расположении зон образования мезомасштабных антициклонов.

Отметим, что в эксперименте Ф1 известная особенность крупномасштабной циркуляции в Черном море, а именно наличие двух циклонических круговоротов («очки Книпповича» [4]), не проявилась. В последующих экспериментах сделана попытка получить двухцентровую циклоническую циркуляцию в вытянутом бассейне путем изменения соотношения его осей и конфигурации. Формы бассейнов, которые использовались в расчетах, приведены на рис. 5. Все другие параметры модели и ветер задавались аналогично эксперименту Ф1.

В эксперименте Ф1 с циркуляцией, состоящей из трех циклонических круговоротов, отношение длины бассейна L к его ширине B составляло $\sim 3,6$. В экспериментах Ф2, Ф3, Ф4 соотношение L/B равнялось 2,6; 2,1; 1,6 соответственно. На рис. 6, *a, z* приведены результаты эксперимента Ф2. Видно, что получился крупный циклонический круговорот в середине бассейна и неустойчивые циклоны слева и справа от него (рис. 6, *a*), которые не проявлялись в осредненном поле (рис. 6, *z*). Также не удалось получить циркуляцию, состоящую из двух циклонов, в экспериментах Ф3, Ф4 (рис. 6, *б, д* и 6, *в, е* соответственно).

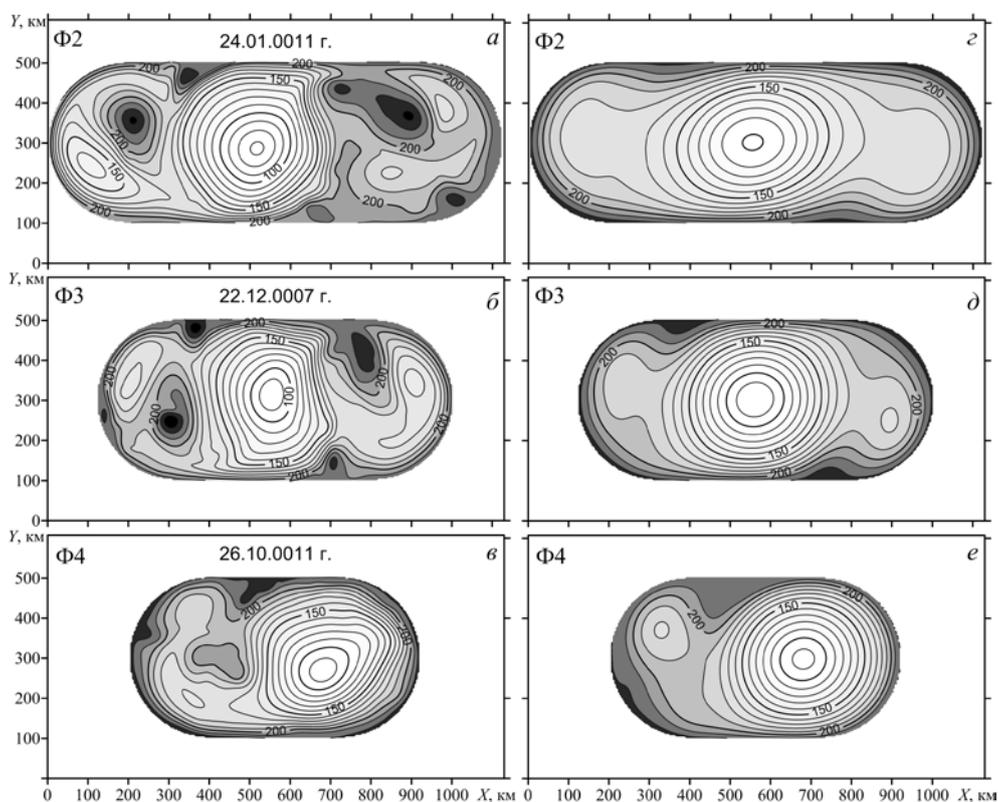


Рис. 6. Мгновенные (*a, б, в*) и осредненные (*z, д, е*) поля h_1 (м) в экспериментах Ф2, Ф3, Ф4

В дальнейших экспериментах использовалась форма бассейна, имеющая вид гантели. В экспериментах Ф5, Ф6, Ф7 ширина средней части («ручки») была задана больше, чем в экспериментах Ф8, Ф9, Ф10. Также такие бассей-

ны отличались между собой по длине. Отметим, что двухцентровая циркуляция сформировалась только в эксперименте Ф5, в наиболее вытянутом бассейне (рис. 7, а, з). Два крупномасштабных циклонических вихря образовались в восточной и западной круговых областях. Антициклоны наблюдались в мгновенных полях, в области между циклонами в центре бассейна – «ручке гантели» (рис. 7, а). В осредненном поле h_1 эксперимента Ф5 в «ручке гантели» располагалась зона циклонической завихренности (рис. 7, з).

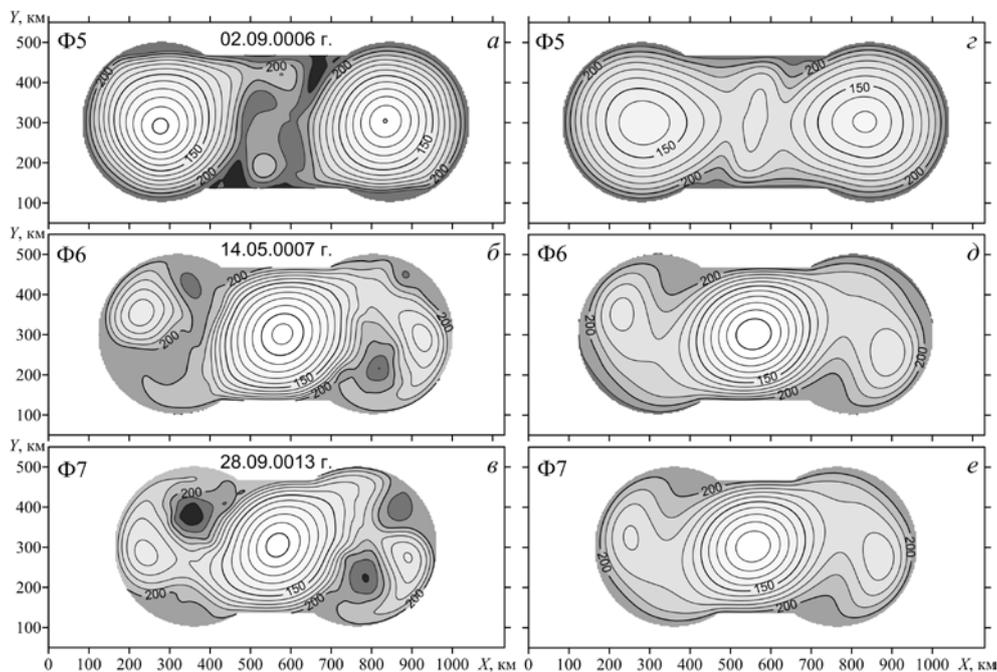


Рис. 7. Мгновенные (а, б, в) и осредненные (з, д, е) поля h_1 (м) в экспериментах Ф5, Ф6, Ф7

В двух других экспериментах – Ф6, Ф7 (рис. 7, б, д, в, е) в бассейне образовывался только один циклон, в центре. Мезомасштабные вихри наблюдались слева и справа от него.

В экспериментах Ф8, Ф9, Ф10 (бассейны в виде гантели с узкой «ручкой») разделение крупномасштабной циркуляции на два круговорота происходило во всех трех случаях, причем в более длинных бассейнах (рис. 8, а, з) мгновенные поля мало отличались от осредненных: крупномасштабные циклонические вихри располагались в круговых областях, а антициклонические – только в области «ручки».

Получилось, что для образования двух устойчивых крупномасштабных вихрей в Черном море обязательным условием является наличие зауженной области в его центральной части. Это утверждение верно при принятых допущениях о горизонтальном дне и постоянном параметре Кориолиса, но, как известно, в западной части моря большую площадь занимает северо-западный шельф с глубинами менее 200 м (рис. 9). Если рассматривать только глубоководную часть Черного моря (например ограниченную изобатой 500 м), то она, в грубом приближении, имеет дугообразную форму.

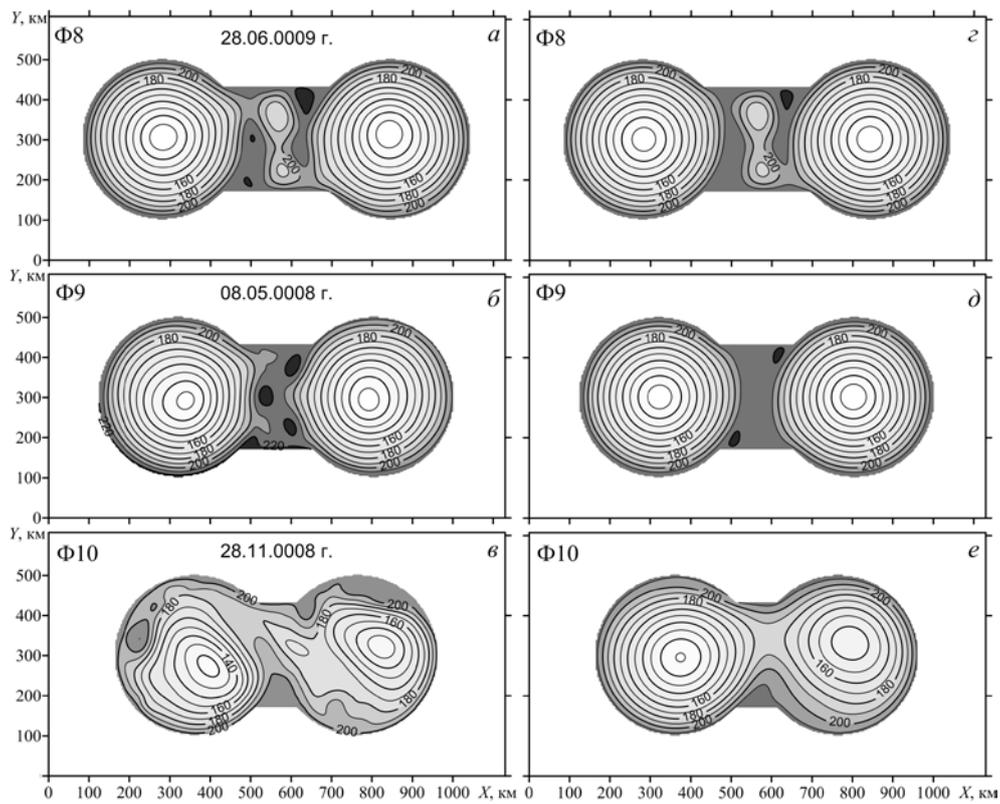


Рис. 8. Мгновенные (а, б, в) и осредненные (z, д, e) поля h_1 (м) в экспериментах Ф8, Ф9, Ф10

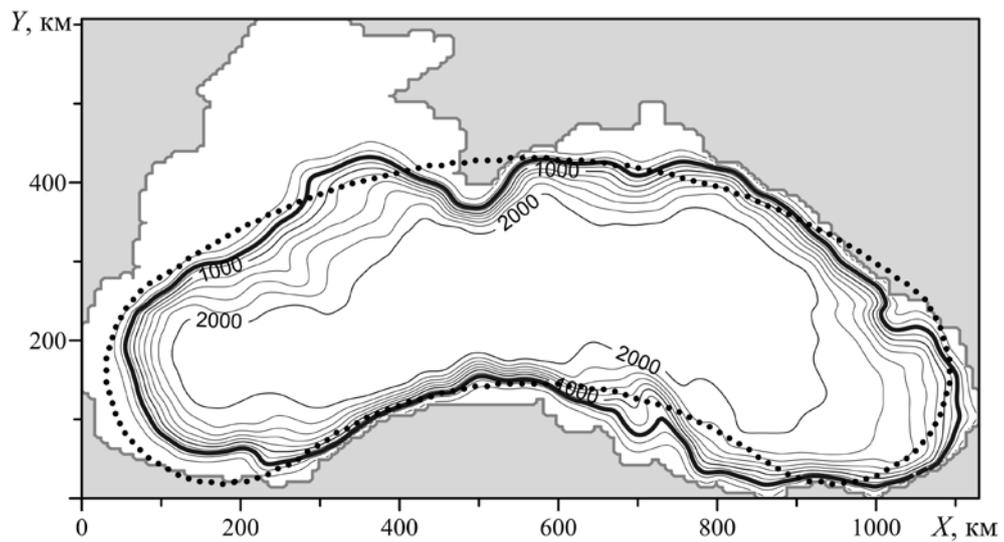


Рис. 9. Карта глубин Черного моря (м). Пунктиром показана форма бассейна, использованная в эксперименте Ф11

Были проведены также дополнительные расчеты, результаты которых показаны на рис. 10. В экспериментах Ф11 и Ф12 использовалась изогнутая форма бассейна. В каждом из них под воздействием стационарного циклонического ветра в течение двух лет образовались два крупномасштабных циклонических круговорота, по одному в западной и восточной части. В эксперименте Ф11 (рис. 10, в) за счет большей длины бассейна в осредненных полях присутствуют дополнительно два циклона малой интенсивности – у восточной границы и в центральной части бассейна. В эксперименте Ф12 с меньшей длиной бассейна слабый циклонический вихрь присутствует только на востоке (рис. 10, з).

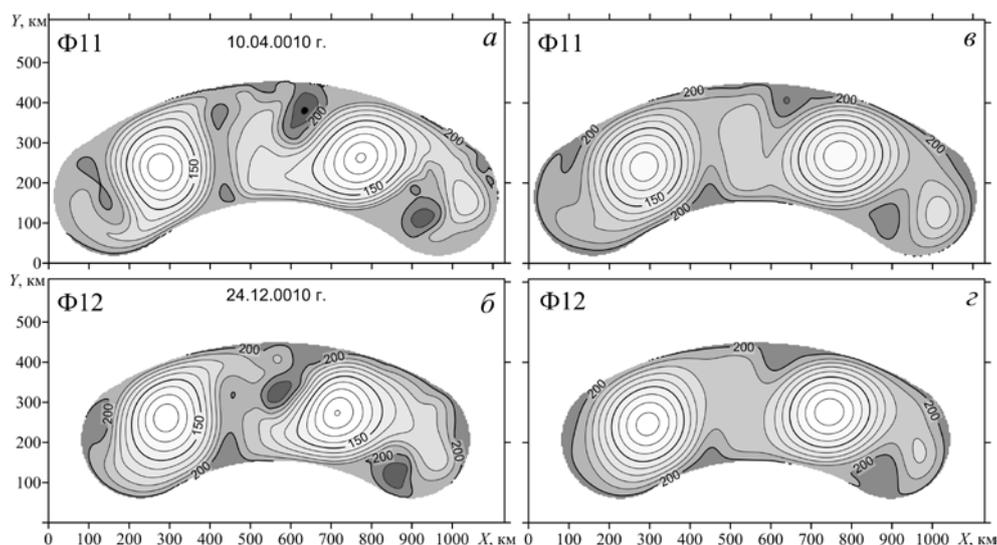


Рис. 10. Мгновенные (а, б) и осредненные (в, з) поля h_1 (м) в экспериментах Ф11, Ф12

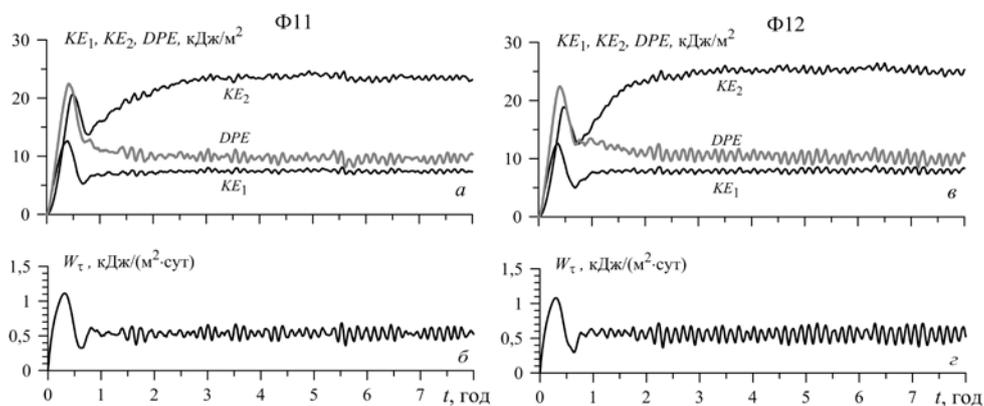


Рис. 11. Графики изменения во времени составляющих энергии KE_1 , KE_2 , DPE (а, в) и работы тангенциального напряжения ветра W_τ (б, з) в экспериментах Ф11, Ф12

Графики энергии и работы тангенциального напряжения ветра, полученные в экспериментах Ф11 и Ф12, приведены на рис. 11. В целом они похожи на графики в эксперименте Ф1 (рис. 3), но, в отличие от них, менее устойчивы (особенно в эксперименте Ф11).

Выводы. Анализируя результаты проведенных экспериментов, можно сказать, что форма бассейна оказывает существенное влияние на формирование циркуляции в море. В частности, от нее зависит продолжительность периодов *spin-up* и адаптации, количество и пространственное распределение крупномасштабных вихрей, образующих основную циркуляцию.

В вытянутых бассейнах циркуляция может разделяться на несколько суббассейновых круговоротов, которые, с одной стороны, пытаются принять круглую форму, а с другой – занять большее пространство. Число образующихся вихрей зависит от отношения длины к ширине бассейна (L/B). В приведенных экспериментах вариациями L/B не удалось получить в вытянутом бассейне циркуляцию, состоящую из двух стационарных циклонов. При $L/B < 2,8$ в бассейне наблюдается только один устойчивый циклонический круговорот, расположенный в центральной части. При $L/B > 3,5$ образуются три квазистационарных суббассейновых круговорота.

Наличие значительных береговых выступов (полуостровов) в вытянутых бассейнах также способствует разделению крупномасштабной циркуляции на отдельные вихри. С другой стороны, такие бассейны можно рассматривать как состоящие из нескольких частей, соединенных проливами. В этом случае разделение циркуляции на отдельные ветви кажется вполне естественным.

Если оценивать полученные результаты применительно к Черному морю, то можно отметить, что наиболее подходящие для него параметры имеют бассейны, которые характеризуются удлиненной изогнутой формой (эксперименты Ф11 и Ф12).

Таким образом, можно сделать вывод, что образование в Черном море двух отдельных циклонических вихрей, известных как «очки Книпповича», обусловлено главным образом вытянутой формой бассейна и влиянием выступающей береговой части Анатолийского п-ова.

Подчеркнем, что описанные результаты получены для бассейнов с горизонтальным дном и при постоянном параметре Кориолиса. Учет рельефа дна и β -эффекта также играет существенную роль в формировании циркуляции как в Черном, так и, например, в Японском море [5, 6], на что было указано рецензентом данной работы (приносим ему свою искреннюю благодарность).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-45-01044 «р_юг_а». Результаты экспериментов для лучшего их представления размещены на сайте <http://blacksea-model.ru> в виде интерактивных графиков и видеофильмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлушин А.А., Шапиро Н.Б., Михайлова Э.Н., Кортаев Г.К. Двухслойная вихререзающая модель ветровых течений в Черном море // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 5. – С. 3 – 12.
2. Holland W.R., Lin L.B. On the generation of mesoscale eddies and their contribution to the oceanic general circulation. I. A preliminary numerical experiment. II. A parameter study // J. Phys. Oceanogr. – 1975. – 5, № 4. – P. 642 – 657.
3. Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р. и др. Основы теории колебаний. – М.: Наука, 1988. – 391 с.
4. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – 212 с.
5. Popomarev V.I., Yurasov G.I. The Tartar (Mamiya) strait currents // J. Kor. Soc. Coas. Ocean Engineers. – 1994. – 6, № 4. – P. 335 – 339.
6. Пономарев В.И., Файман П.А., Машикина И.В. и др. Моделирование разномасштабной циркуляции в северо-западной части Японского моря // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ИПТС, 2015. – Вып. 2 (22). – С. 65 – 73.

Effect of the basin shape on formation of the Black Sea circulation

A.A. Pavlushin, N.B. Shapiro, E.N. Mikhailova

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: pavlushin@mhi-ras.ru*

The results of numerical modeling of the wind circulation in the basins of various configurations, with horizontal bottom and with no account of the β -effect are represented. The present paper is a continuation of a series of experiments on numerical modeling the processes of formation of the Black Sea hydrophysical fields using a two-layer eddy-resolving model. Stationary cyclonic wind is used as an external forcing. It is shown that in the stretched basins the large-scale circulation arising due to the wind vorticity is divided into a few sub-basin gyres tending to take a shape of circles inscribed in the basin geometry. The number of such gyres depends on the ratio between the basin length and width: the more stretched the pool, the larger the number of the induced vortices. The processes of the current fields' formation in the basin are also affected by the coastline features. The experiments confirm that formation of two separate cyclonic vortices in the Black Sea known as "Knipovich Glasses" is conditioned by the stretched shape of the basin and the influence of the Anatolian peninsula extension.

Keywords: Black Sea, eddy-resolving model, numerical experiment, hydrodynamic instability of currents, basin shape.