

УДК 561.465.(262.5)

Михайлова Э.Н., к.ф.м.н., Полонский А.Б., чл-корр. НАН Украины,
Шокурова И.Г., к.г.н.
Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

О СВЯЗИ ИНТЕНСИВНОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ В ЧЕРНОМ МОРЕ С ЗАВИХРЕННОСТЬЮ ПОЛЯ ВЕТРА

На основе адаптационных расчетов в рамках трехмерной численной модели с высоким пространственным разрешением и данных атмосферного реанализа исследуется связь межгодовой-десятилетней изменчивости крупномасштабной циркуляции в Черном море с завихренностью поля ветра. Анализируются адаптационные расчеты для октября-ноября и февраля-марта двух типов. Первая серия численных экспериментов проводится на основе адаптации архивных данных наблюдений по температуре и солености за 30 лет и осредненному за десятилетние периоды полю ветру. Вторая серия расчетов проводится по данным, объединенным в группы для лет с высокими и низкими значениями завихренности поля ветра. Показано, что на межгодовом масштабе интенсивность крупномасштабной циркуляции в Черном море тесно связано с изменчивостью средней завихренности поля ветра над акваторией моря. На десятилетнем масштабе такая связь не выявлена. Вместе с тем увеличение площади с преобладающей циклонической завихренностью поля ветра десятилетнего масштаба сопровождается усилением средних течений.

Ключевые слова: Черное море, изменчивость интенсивности циркуляции, завихренность поля ветра, преобладающее направление ветра.

Введение. Известно, что одной из основных причин временной изменчивости циркуляции в Черном море является изменение завихренности касательного напряжения ветра [1-3]. Это особенно хорошо проявляется во внутригодовой изменчивости крупномасштабной циркуляции в Черном море, которая имеет хорошо выраженный годовой ход [2,3]. Интенсификация крупномасштабной циркуляции начинается в октябре как отклик на сезонное усиление завихренности поля ветра над Черным морем. Максимальная интенсивность течений отмечается в марте-апреле, т.е., со сдвигом в один-два месяца после достижения максимума величины завихренности поля ветра, отмечаемого в феврале [2-4]. Затем происходит ослабление течений.

В настоящее время в ряде работ выполнены оценки более низкочастотной (межгодовой-десятилетней) изменчивости циркуляции вод в Черном море. В работе [5] на основе численного моделирования с использованием ассимиляции натуральных данных выполнен реанализ гидродинамических полей в Черном море для периода 1971- 2000 гг. Авторами выделена положительная тенденция в изменчивости интенсивности циркуляции вод, которая связывается с увеличением завихренности касательного напряжения трения ветра для этих лет. При этом использовались данные европейского реанализа (ERA-40) за 1958–2002 гг. с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$.

В работах [6,7] проведены динамические расчеты десятилетних полей течений по архивным гидрологическим данным за февраль и август для периода 1951-1995 гг. Для февраля получено долговременное увеличение средней по морю кинетической энергии (КЭ). При этом наиболее заметное усиление течений отмечалось в юго-западной части моря. Вместе с тем, в юго-восточной части моря, наоборот, выделялся отрицательный тренд во временном ходе КЭ. Долговременное уменьшение интенсивности течений в юго-восточной части Черного моря связывалось с особенностями пространственно-

временной структуры поля ветра, проявляющимися, в частности, в ослаблении завихренности ветра в этом районе. При этом использовались данные реанализов ERA-40 за 1958–2002 гг. (с пространственным разрешением $2,5^\circ \times 2,5^\circ$) и NCEP/NCAR за 1948–2008 гг. (с пространственным разрешением $1,905^\circ \times 1,875^\circ$). Отмечалось, что на десятилетнем масштабе однозначной связи интенсивности течений со средней по акватории величиной завихренности ветра не обнаруживается. Это может быть связано с тем, что накопление доступной потенциальной энергии в области пикноклина происходит в течение всего осенне-зимнего сезона, причем термохалинные факторы играют более существенную роль в изменчивости интенсивности циркуляции десятилетнего масштаба по сравнению с межгодовыми ее вариациями.

Целью данной работы является анализ зависимости интенсивности крупномасштабной циркуляции в Черном море от завихренности поля ветра над акваторией моря. Адаптационные расчеты течений проводились на основе трехмерной гидродинамической модели с высоким пространственным разрешением с использованием в качестве исходных данных гидрологических полей, восстановленных в узлах регулярной сетки по данным измерений в зимние (февраль-март) и осенние (октябрь-ноябрь) месяцы. Вычислялись осредненные за десятилетние периоды (1960-е, 1970-е и 1980-е гг.) поля скоростей течений и циркуляционные характеристики по данным измерений температуры и солёности, сгруппированным отдельно для лет с высокими и с низкими значениями завихренности напряжения трения ветра в период с середины 1950-х по середину 1990-х гг.. Проанализирована пространственно-временная изменчивость поля скорости и кинетической энергии течений в зависимости от величины завихренности ветра.

Модель. Для проведения расчетов используется трехмерная численная модель на основе «примитивных» уравнений гидротермодинамики с высоким пространственным разрешением [8]. В модели рассчитывается топография уровня поверхности моря. Исходная система дифференциальных уравнений аппроксимируется разностными аналогами на основе консервативной схемы (бокс-метод) с использованием дозированной схемной диффузии при расчете температуры и солёности. Схема двухслойная по времени, неявная при аппроксимации вертикальной диффузии, вязкости, адвекции, придонного трения и ускорения Кориолиса. Разностная сетка неравномерная и сдвинута как по горизонтали (сетка B), так и по вертикали.

Рельеф дна аппроксимируется максимально приближенным к реальному, а именно: предполагается, что толщина нижнего придонного бокса является переменной величиной и определяется как разность между реальной глубиной моря и глубиной нижней границы предпоследнего бокса.

На поверхности моря задается тангенциальное напряжение ветра. На дне принимаются условия обтекания с трением. На боковых твердых границах задаются условия прилипания для горизонтальных компонент скорости течения и дополнительные условия, связанные с введением бигармонического оператора для диссипации. Потоки тепла и соли на всех границах полагаются равными нулю, так как проводятся адаптационные расчеты на небольшой период (до 20 суток) с использованием реальных гидрологических данных. Анализируются результирующие поля температуры, солёности и течения после окончания процедуры адаптации без обсуждения перестройки этих полей в процессе расчетов.

Сетка модели представляет собой боксы, размеры которых составляют $2,5'$ вдоль параллели ($3,36$ км) и $1,25'$ вдоль меридиана ($2,31$ км). По вертикали она включает 26 базовых горизонтов: $0,5$, $1,5$, $6,5$, $11,5$, $16,5$, $21,5$, $31,5$, $41,5$, $66,5$, $91,5$, $116,5$, $141,5$, $178,5$, $221,5$, $268,5$, $321,5$, $418,5$, $521,5$, $678,5$, $851,5$, $1076,5$, $1301,5$, $1526,5$, $1751,5$ м, на которых вычисляются горизонтальные составляющие скорости течения, температура и

соленость. Вертикальные составляющие скорости течения рассчитываются на поверхности, дне моря и на горизонтах, расположенных посередине между основными горизонтами.

Коэффициент вертикальной вязкости A берется зависящим от глубины моря $H(x,y)$: $A = A_0 \min(1, H/H_0)$, где $A_0 = 100 \text{ см}^2/\text{с}$, $H_0 = 50 \text{ м}$. Коэффициент горизонтальной вязкости $A_L = 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$, коэффициенты вертикальной и горизонтальной диффузии $\mu_z = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$, $\mu_L = 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$ соответственно. При расчете горизонтальных адвективных составляющих используется полная схемная вязкость и диффузия.

Расчеты проводятся методом Сармиенто-Брайена [9], который позволяет проводить расчеты на достаточно длительные сроки, не давая при этом гидрологическим полям заметно отклоняться от данных, используемых в качестве начальных. Расчетный период составляет около 20 суток, шаг по времени – 7,5 мин.

Усваемые гидрологические данные. В качестве начальных данных для адаптационных расчетов использовались поля температуры и солености, восстановленные в узлах регулярной сетки по данным гидрологических измерений в Черном море из банка данных МГИ НАН Украины [10]. Поля вычислялись методом оптимальной интерполяции на стандартных горизонтах (как наиболее обеспеченных данными), сглаживались и затем интерполировались на горизонты модели. Так как глубоководные слои моря недостаточно обеспечены данными, то, начиная с горизонта 1200 м и глубже, использовались однородные поля, определяемыми по осредненным профилям.

Атмосферные данные. Используются данные о поле ветра на высоте 10 м над уровнем моря реанализа NCEP/NCAR (1948–2008 гг., с пространственным разрешением $1.905^\circ \times 1.875^\circ$) с интервалом 6 часов [11]. По ним производятся следующие расчеты.

Во-первых, рассчитываются поля касательного напряжения трения ветра, применяемых в качестве граничных условий на поверхности моря. Они рассчитываются для каждого срока в каждой точке сетки по аэродинамической формуле $\vec{\tau} = \rho_a C_d \vec{V}^2$ ($\text{Н}/\text{м}^2$), где ρ_a – плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$), C_d – коэффициент сопротивления морской поверхности (безразмерная величина), \vec{V} – скорость ветра на высоте 10 метров над уровнем моря ($\text{м}/\text{с}$). Расчет коэффициента C_d производится по эмпирическим формулам из [12,13] с учетом зависимости от скорости ветра.

Поля касательного напряжения ветра осредняются за десятилетия или для лет, соответствующие интенсивной и слабой завихренности, и интерполируются на сетку модели. Рассчитанные таким образом поля используются в качестве граничных условий на поверхности моря. Подключение ветра производится с первого шага по времени.

Во-вторых, на основе указанных атмосферных данных проводится анализ пространственно-временной изменчивости завихренности напряжения ветра над морем. Завихренность вычисляется на сетке $1.905^\circ \times 1.875^\circ$, но в узлах, являющихся центрами квадратов, в вершинах которых расположены вычисленные значения напряжения трения ветра. Это позволяет избежать излишнего сглаживания поля завихренности. Средние по акватории моря значения завихренности касательного напряжения трения ветра вычисляются после проведения интерполяции осредненного за определенный временной интервал поля на более мелкую сетку. Отметим, что в атмосфере вертикальная ось считается направленной вверх. Поэтому положительные значения соответствуют циклонической завихренности поля ветра.

И, в-третьих, по данным реанализа в серии расчетов течений для лет с высокой и низкой завихренностью поля ветра выявляется преобладающее направление ветра в эти

годы. Первоначально по всему ряду данных для каждого срока вычисляется средняя по акватории скорость ветра, а направление вектора скорости привязывается к одному из восьми основных румбов (север, северо-восток, восток и т.д.). Определение доминирующего направления за определенный временной интервал (например, месяц) проводится путем суммирования ситуаций каждого из восьми направлений и выбора наиболее повторяемого направления.

Результаты. Десятилетняя изменчивость циркуляции вод Черного моря. Основной элемент крупномасштабной циркуляции в Черном море - Основное черноморское течение (ОЧТ). Оно представляет собой циклонический кольцевой поток, в основном концентрирующийся вдоль кромки шельфа. ОЧТ формирует два крупномасштабных циклонических круговорота в восточной и западной частях моря. Положение, размеры и интенсивность этих круговоротов претерпевают изменения в течение года, от одного года и десятилетия к другому. В центральных частях круговоротов скорости течений малы, поэтому вариации величины средней по акватории моря КЭ, особенно в зимний период, в основном отражают изменения скорости ОЧТ. Осенью значимый вклад в среднее значение КЭ могут вносить и достаточно интенсивные течения в квазистационарном антициклоническом вихре – Батумском антициклоне.

Для обоих сезонов нами получено увеличение КЭ поверхностных течений от 1960-х к 1980-м гг. Оно составляет около 17% для октября-ноября и около 20% для февраля-марта. В основном это увеличение происходит в 1980-е гг. От 1960-х к 1970-м годам увеличение кинетической энергии незначительное (Табл. 1).

В осенние месяцы ОЧТ представляет собой единый кольцевой поток с более интенсивной северной ветвью. Отметим, что у восточного побережья в 1970-е гг. в пространственной структуре поля течения выделяются перманентные вихревые образования. В 1980-е гг. южная ветвь ОЧТ усиливается по сравнению с предыдущими десятилетиями (рис. 1,б).

В зимние месяцы крупномасштабная пространственная структура ОЧТ более четко выражена, а его интенсивность выше по сравнению с осенними месяцами (рис. 2,б). От осени к зиме кинетическая энергия течений увеличивается примерно в 1,5 раза для всех десятилетий (табл. 1).

Таблица 1. Средние по акватории завихренность касательного напряжения ветра, КЭ течений и соленость на горизонтах 0,5м и 91,5м

Месяцы	$(rot_z \tau)_{cp}$ ($\times 10^{-7}$ Н/м ³)	КЭ (см ² с ⁻²)		Соленость (‰)	
		0,5 м	91,5 м	0,5 м	91,5 м
Октябрь-ноябрь					
1960-е гг.	0,16	30	16	17,91	19,67
1970-е гг.	0,16	32	21	18,00	19,74
1980-е гг.	0,27	35	19	17,88	19,93
Февраль-март					
1960-е гг.	0,50	47	28	18,16	19,64
1970-е гг.	0,65	48	29	18,22	19,74
1980-е гг.	0,50	55	34	18,06	19,82

Максимальные значения средней по акватории величины завихренности отмечались в 1970-е гг. в феврале-марте. В октябре-ноябре средняя завихренность была максимальна в 1980-е гг. При этом наибольшие величины не осредненного по

пространству $rot_{\vec{t}}$ отмечались в восточной части акватории в 1960-е годы. Распределение $rot_{\vec{t}}$ по акватории вообще характеризуется более высокими положительными его значениями в восточной части моря для всех десятилетий. Для западной части моря более характерна антициклоническая завихренность ветра. В осенние месяцы 1960-х и 1970-х гг. область с циклонической завихренностью поля ветра отмечается только в восточной части моря (рис. 1). Но в 1980-е гг. в оба анализируемых сезона область с циклонической завихренностью захватывает и большую часть западной половины моря. Это может служить объяснением максимальной средней завихренности поля ветра над Черным морем и высокой интенсивности течений в этот период (рис.1, 2).

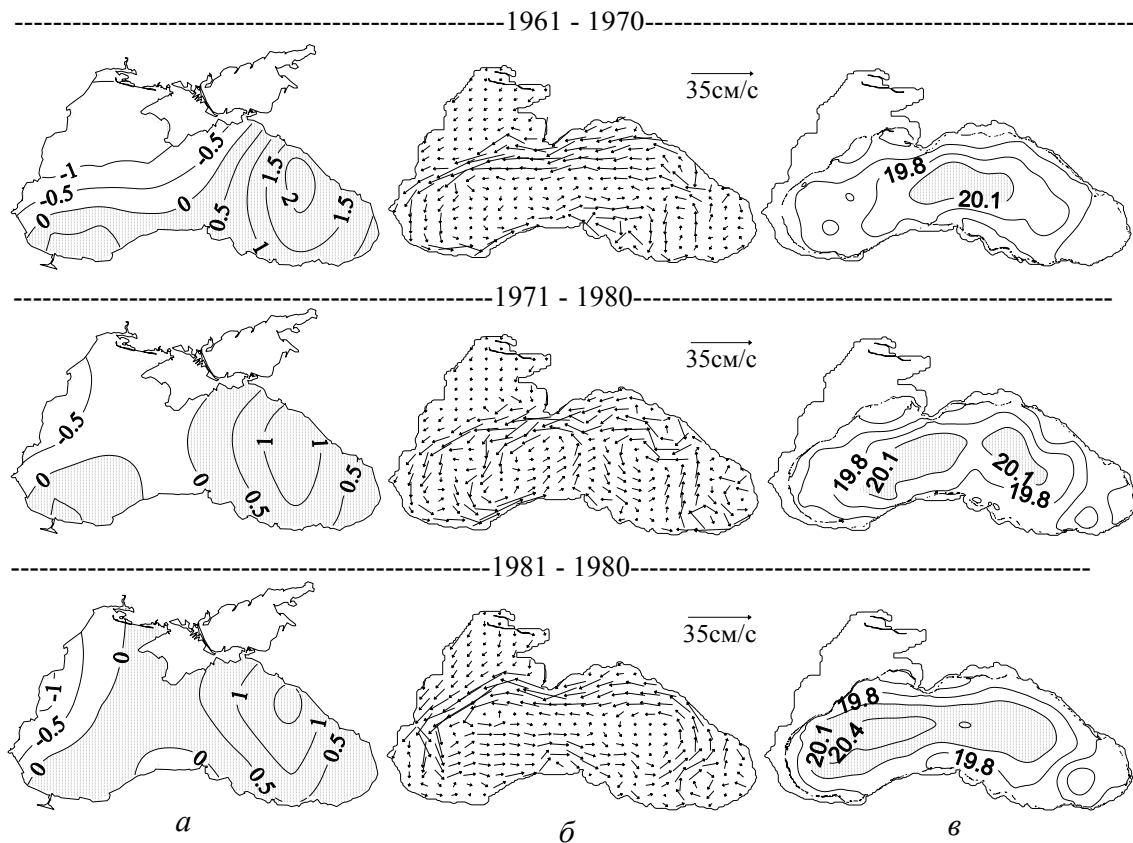


Рис. 1 Поля завихренности касательного напряжения трения ветра ($\text{Нм}^{-2} \times 10^{-7}$) (а), скоростей течений на поверхности моря (0,5 м) (б), поля солёности в пикноклине (горизонт 92,5 м) (в), по данным октября-ноября для 1961-1970 (верхний ряд), 1971-1980 (средний ряд) и 1981-1990 гг. (нижний ряд).

Пространственная структура поля течений в глубоководной части моря и солёность пикноклина согласуются между собой вследствие геострофичности крупномасштабных течений (известно, что основной вклад в изменения плотности в Черном море вносит солёность, [1,3]). В период 1981 – 1990 гг., характеризующийся более высокими скоростями течений отмечаются и более высокие значения солёности в центрах восточного и западного циклонических круговоротов по сравнению с двумя предыдущими десятилетиями.

Прямая связь интенсивности средней по морю циркуляции со средней величиной завихренности ветра над морем для выделенных месяцев на десятилетних временных масштабах отсутствует (табл. 1). Однако при анализе пространственно-временной

изменчивости поля $rot_z \bar{\tau}$ над Черным морем и поля течений для отдельных районов прямая зависимость между ними была обнаружена в [6]. Это подтверждается и нашими результатами. Причем, в соответствие с адаптационными расчетами, увеличение площади с преобладающей циклонической завихренностью поля ветра над акваторией моря сопровождается и усилением средних течений. Кроме этого необходимо отметить наличие положительного тренда в среднегодовой величине завихренности касательного напряжения трения ветра во временном ряду с 1948 по 2008 гг. (рис. 3).

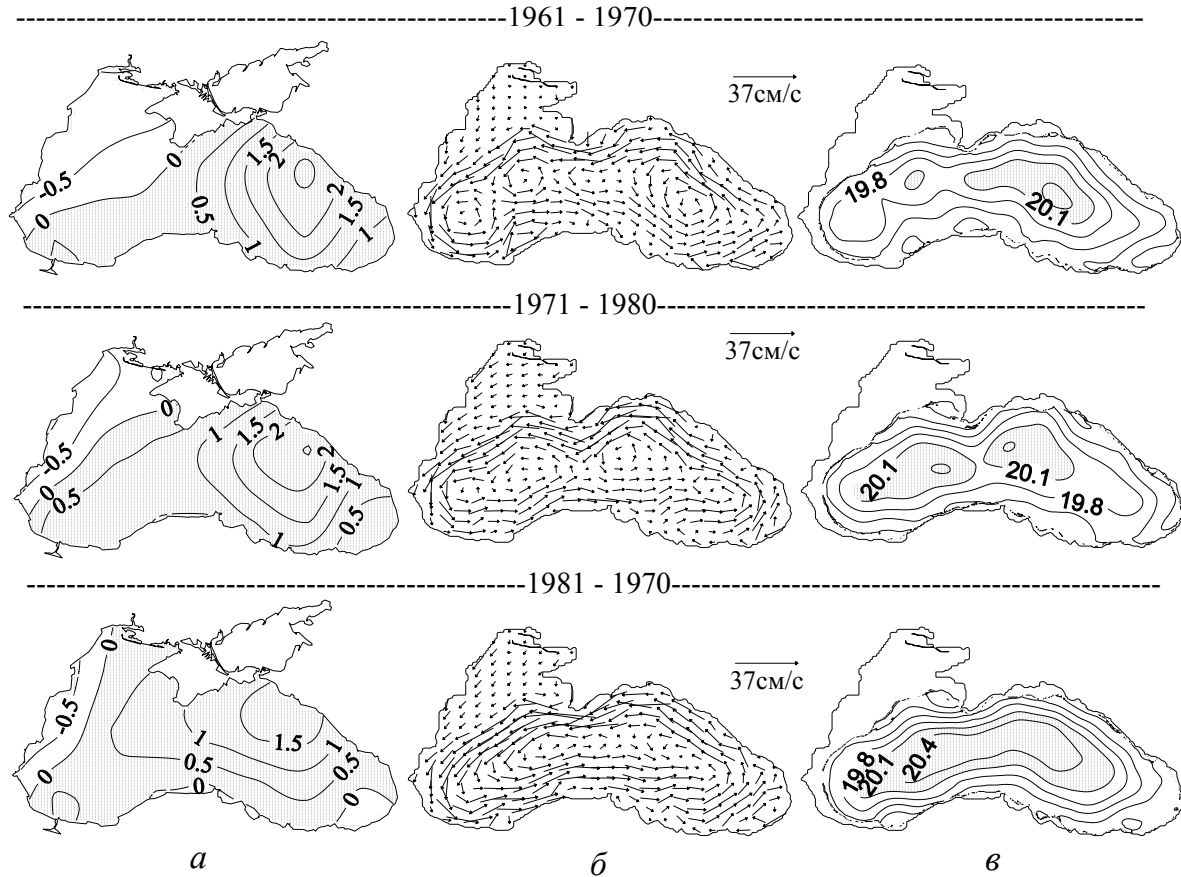


Рис. 2. То же, что на рис.1 по данным для февраля-марта

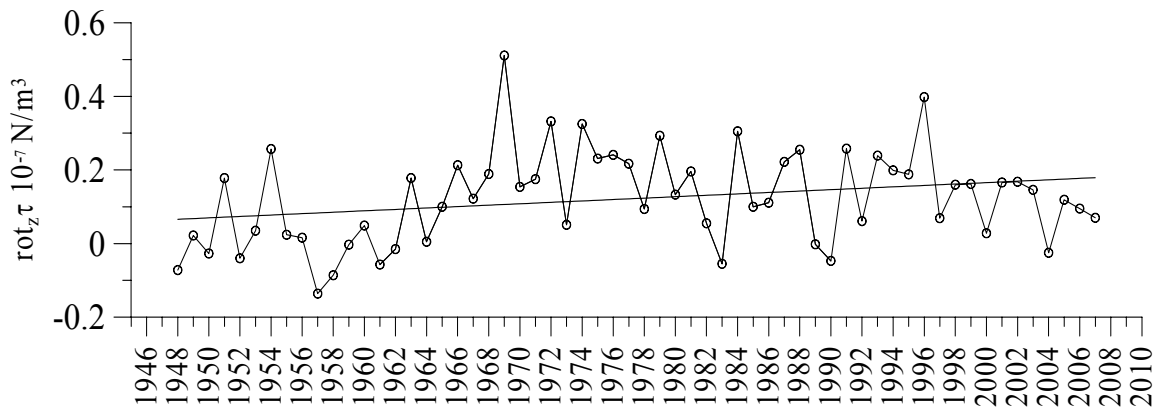


Рис. 3. Межгодовая изменчивость среднегодовой завихренности напряжения трения ветра ($\times 10^{-7} \text{Нм}^{-2}$)

Межгодовая изменчивость циркуляции вод Черного моря. Для анализа связи интенсивности циркуляции и завихренности поля ветра на межгодовых временных масштабах были проведены численные эксперименты с расчетами на основе композитных групп. Выбирались годы с высокими и низкими значениями завихренности касательного напряжения трения ветра (рис. 4). Для октября-ноября в качестве верхнего и нижнего пределов использовались величины $0,25 \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$ и $0,15 \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$, для февраля-марта – величины $0,5 \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$ и $0,3 \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$. Границы выбирались относительно среднего значения с учетом дисперсии $rot_z \bar{\tau}$, которая выше для зимнего сезона. В соответствии с этими условиями гидрологические данные объединялись в группы для лет с высокими и низкими значениями завихренности поля ветра. На основе этих групп проводились адаптационные расчеты течений.

Предварительный анализ данных по завихренности поля ветра и преобладающим направлениям ветра показал, что высокие значения завихренности отмечаются при северных, северо-восточных и восточных ветрах с максимальными значениями при северо-восточных ветрах. Низкие значения завихренности – при северо-западных, западных и юго-западных ветрах с минимумом при западных ветрах (рис.4). Этот результат важен для интерпретации динамического отклика поля течений на изменяющиеся ветровые условия.

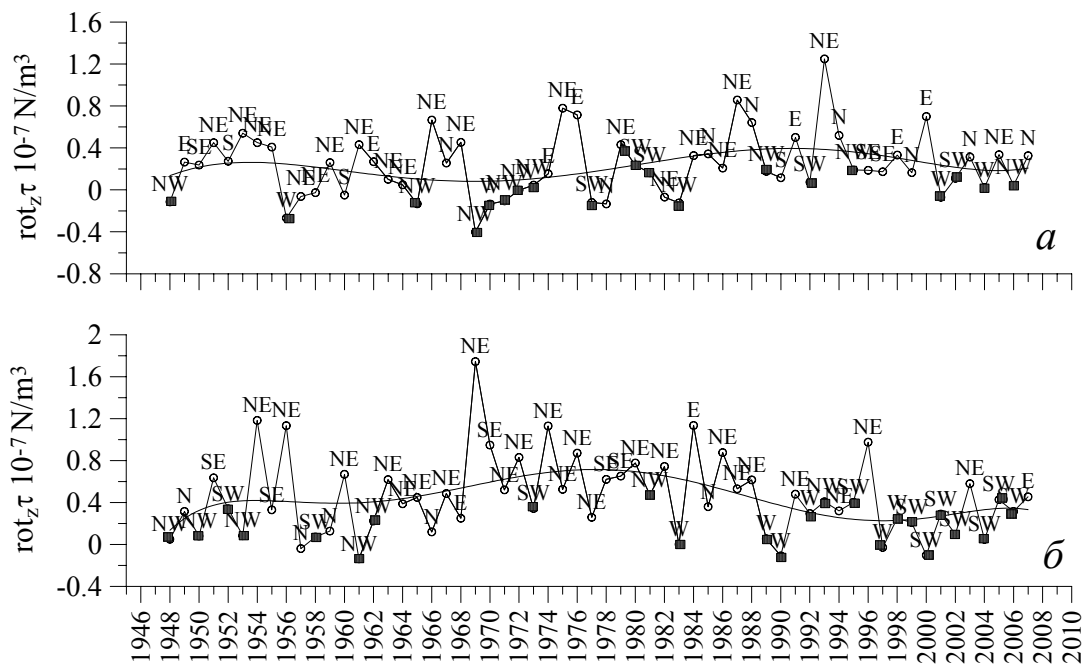


Рис. 4. Межгодовая изменчивость завихренности напряжения трения ветра ($\times 10^{-7} \text{ Нм}^{-2}$) для октября-ноября (а) и февраля-марта (б). (■ – завихренность при ветрах с западной составляющей)

И в октябре-ноябре, и в феврале-марте усиление циркуляции происходит в годы с высокими значениями а ослабление – в годы с низкими значениями завихренности поля ветра, осредненной по акватории моря (Таблица 2). Кинетическая энергия поверхностных течений в среднем по морю в годы с высокими значениями завихренности поля ветра почти вдвое выше, чем в годы с низкими ее значениями. В пикноклине также наблюдается соответствующая тенденция, но разница КЭ в годы с более и менее интенсивной завихренностью существенно меньше. В силу

геострофичности течений, высокие значения завихренности поля ветра при восточных ветрах приводят к увеличению солености и в поверхностном слое и в пикноклине (Таблица 2). Отметим, что из-за запаздывания геострофической циркуляции относительно управляющего ветрового воздействия соленость и интенсивность геострофических течений в пикноклине увеличиваются асинхронно с $rot_z \vec{\tau}$. Поэтому максимальный эффект усиления $rot_z \vec{\tau}$ в пикноклине должен наблюдаться с запаздыванием около одного-двух месяцев.

Структура поверхностных течений существенно различается для лет с более интенсивной и менее интенсивной циркуляцией (рис. 5, 6). Так как наиболее высокие значения завихренности поля ветра отмечаются в основном при северо-восточных ветрах, при общей интенсификации циркуляции происходит, прежде всего, усиление северной ветви ОЧТ. Одновременно происходит интенсификация ветровых течений на северо-западном шельфе. Южная ветвь ОЧТ в октябре-ноябре при северо-восточных ветрах ослабевает. При низких значениях завихренности поля ветра (когда преобладают ветры с западной составляющей) происходит ослабление северной ветви и усиление южной ветви ОЧТ. Ветровые течения на северо-западном шельфе при этом слабые.

Заключение. Анализ межгодовой-десятилетней изменчивости интенсивности крупномасштабной циркуляции в Черном море и ее связи с интенсивностью завихренности касательного напряжения трения ветра на основе адапционных расчетов по трехмерной гидродинамической модели с высоким пространственным разрешением и данных атмосферного реанализа показал следующее.

Таблица 2. Средний КЭ течений и соленость на горизонтах 0,5м и 91,5 для лет с высокими и низкими значениями завихренности касательного напряжения ветра

Месяцы	$(rot_z \tau)_{cp}$ ($\times 10^{-7}$ Н/м ³)	КЭ (см ² с ⁻²)		Соленость (‰)	
		0,5 м	91,5 м	0,5 м	91,5 м
Октябрь-ноябрь	>0,25	58	26	17,94	19,90
Октябрь-ноябрь	<0,15	33	22	17,87	19,84
Февраль-март	>0,5	80	42	18,17	19,80
Февраль-март	<0,3	47	29	18,09	19,76

Долговременное усиление циркуляции вод получено в верхнем слое на междесятилетних временных масштабах для февраля-марта и октября-ноября в период 1961-1990 гг., что подтверждает результаты выполненных ранее геострофических и ассимиляционных расчетов [6, 15]. Показано, что интенсивность крупномасштабной циркуляции в Черном море на десятилетних масштабах зависит не столько от величины средней завихренности поля ветра над морем, сколько от площади, занятой циклонической завихренностью.

На межгодовых масштабах величина КЭ поверхностных течений в годы с высокими значениями завихренности поля ветра вдвое выше, чем в годы с низкими значениями. Положительная (циклоническая) завихренность наблюдается в основном при ветрах с восточной составляющей, а антициклоническая - при ветрах с западной составляющей. Наибольшие величины завихренности поля ветра отмечаются при северо-восточном ветре. При ветрах с восточной составляющей главным образом

усиливаются течения в северной ветви ОЧТ и ветровые течения на северо-западном шельфе. При ветрах с западной составляющей на фоне общего ослабления циркуляции вод усиливаются течения в юго-западной ветви ОЧТ.

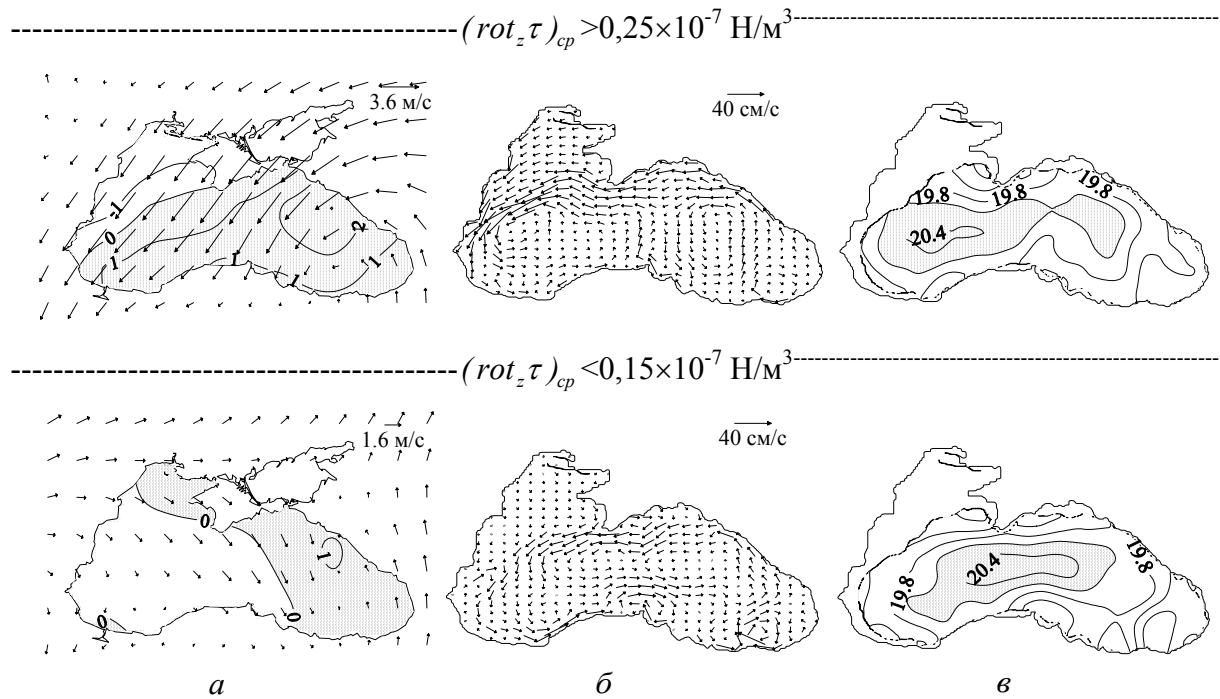


Рис. 5. Поля завихренности касательного напряжения трения ветра ($\text{Нм}^{-2} \times 10^{-7}$) (а), скоростей течений на поверхности моря (0,5 м) (б), поля солёности в пикноклине (горизонт 92,5 м) (в), вычисленные при величине средней завихренности поля ветра $(rot_z \tau)_{cp} > 0,25 \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$ (верхний ряд) и $(rot_z \tau)_{cp} < 0,15 \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$ (нижний ряд) для октября-ноября.

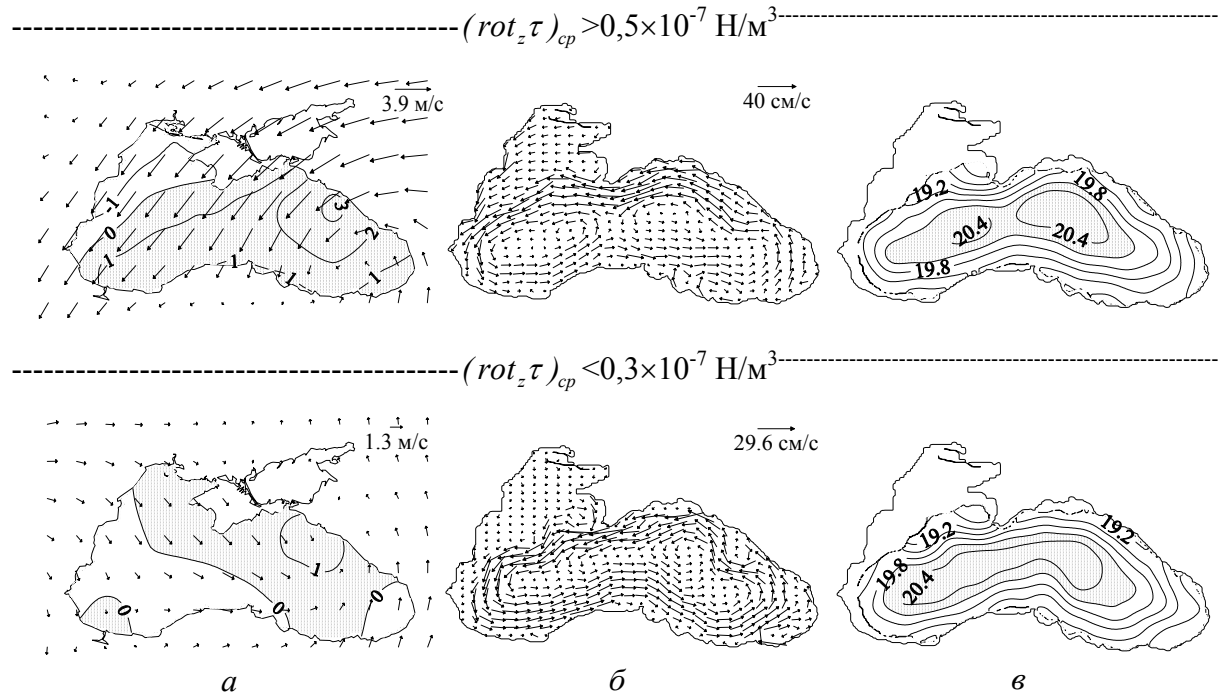


Рис. 6. То же, что на рис. 5 при $(rot_z \tau)_{cp} > 0,5 \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$ (верхний ряд) и $(rot_z \tau)_{cp} < 0,3 \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$ (нижний ряд) для февраля-марта.

Учитывая мемориальный характер настоящей работы, необходимо отметить следующее обстоятельство. Полученные относительно КЭ течений поверхностного слоя количественные выводы могут быть уточнены, если использовать более общие параметризации коэффициентов вертикального и горизонтального турбулентного обмена, типа тех, что были успешно использованы В.А.Шнайдманом и А.Г.Тарнапольским для решения ряда прикладных задач [16,17]. Профессора В.А.Шнайдманом и А.Г.Тарнапольским в разное время возглавляли кафедру геофизической гидродинамики в Одесском гидрометеорологическом институте и внесли большой вклад не только в разработку параметризации процессов перемешивания, но и в подготовку квалифицированных кадров-метеорологов и океанологов.

Список литературы

1. *Stanev, E.V.* Understanding Black Sea dynamics // *Oceanography*. – 2005. – 18, № 2. – P. 56 – 75.
2. *Коротаев Г.К.* О причине сезонного хода циркуляции Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. – 2001. – № 6. – С. 14 – 20.
3. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 239 с.
4. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Многолетняя изменчивость завихренности напряжения трения ветра в Черном море по данным реанализа Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. научн. тр. / НАН Украины, МГИ, ИГН, ОФ ИнБЮМ. – Севастополь, 2011. Вып. 24. – С. 182– 189.
5. Кныш В.В., Коротаев Г.К., Моисеенко В.А. и др. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971 – 1993 гг. // *Известия РАН: Физика атмосферы и океана*. – 2011. – т. 47, № 3. – С. 433-446.
6. *Полонский А.Б., Шокурова И.Г.* Декадная изменчивость характеристик пикноклина и геострофической циркуляции вод Черного моря в зимний период // *Метеорология и гидрология*. – 2009. – № 4. – С. 75 – 91.
7. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. О сезонном ходе геострофической циркуляции в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. – 2010. – №1. – С. 16–31.
8. Андросович А.И., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б. Численная модель и расчеты циркуляции вод северо-западной части Черного моря. // *Морской гидрофизический журнал*. – 1994. – №5. – С. 28-42.
9. *Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / Под общ. ред. В.Н. Еремеева*. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – 704с.
10. *Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler at al.* The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project / *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 1996. – Vol. 77. – P. 437-471.
11. *Hellerman S., Roserstein M.* Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates // *J. Phys. Oceanogr.* – 1983. – 13, № 7. – P 1093 – 1104.
12. *Large W.G., Pond S.* Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds // *Ibid.* – 1981. – 11, № 3. – P. 324 – 336.
13. *Кныш В.В., Коротаев Г.К., Демышев С.Г., Белокопытов В.Н.* Долговременные изменения термохалинных и динамических характеристик Черного моря по

- климатическим данным температуры и солености и их ассимиляции в модели // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 3. – С. 11 – 30.
14. Шнайдман В.А. Модель стратифицированного бароклинного пограничного слоя атмосферы, параметризация горизонтального турбулентного обмена и их приложение к решению прикладных задач // Автореферат дис. доктора физ.-мат. наук (11.00.09) . – 1990. - ГГО.- Ленинград. – 32с.
15. Тарнапольский А.Г. Модель геофизического пограничного слоя и ее приложение к решению прикладных задач в различных географических // Диссертация... доктора географ. наук (11.00.09) . – 1994. - УкрНИЦЭМ.- Одесса. – 377с.

**Про зв'язок інтенсивності циркуляції в Чорному морі із завихреністю поля вітру
Михайлова Е.Н., Полонский О.Б., Шокурова І.Г.**

На основі адаптаційних розрахунків в рамках тривимірної чисельної моделі з високим просторовим розділенням і даних атмосферного реаналізу досліджується зв'язок міжрічної-десятилітньої мінливості великомасштабної циркуляції в Чорному морі із завихреністю поля вітру. Аналізуються адаптаційні розрахунки для жовтня-листопаду і лютого-березня двох типів. Перша серія чисельних експериментів проводяться на основі адаптації архівних даних спостережень з температури і солоності за 30 років і усередненому за десятилітні періоди полю вітру. Друга серія розрахунків проводиться за даними, з'єднаними в групи для років з високими і низькими значеннями завихреності поля вітру. Показано, що на міжрічному масштабі інтенсивність великомасштабної циркуляції в Чорному морі тісно пов'язана з мінливістю середньої завихреності поля вітру над акваторією моря. На десятилітньому масштабі такий зв'язок не виявлений. Разом з тим збільшення площі з переважаною циклонічною завихреністю поля вітру десятилітнього масштабу супроводжується посиленням середніх течій.

Ключові слова: Чорне море, мінливість інтенсивності циркуляції, завихреність поля вітру, переважаний напрям вітру.

**About relationship between circulation intensity in the Black sea and the wind field vorticity
Mihaylova E.N., Polonskiy A.B., Shokurova I.G.**

On the basis of adaptive computations in the framework of three-dimensional numerical model with high spatial resolution and data of reanalysis relationship between the interannual-decennial changeability of large-scale circulation in the Black sea and the vorticity of wind field is examined. Two types of adaptive computations for October-November and February-March are analyzed. First series of numerical experiments are carried out on the basis of adaptation of the archival temperature and salinity data for 30 years and wind fields averaged for ten-year periods. The second series of computations is conducted from the data joined in groups for years with the high and low values of the vorticity of wind field. It is shown, that for interannual scale the intensity of large-scale circulation in the Black sea is connected with changeability of middle vorticity of wind fields over the sea. For ten-year scale such relationship is not revealed. Though increasing area with prevailing cyclonic vorticity of wind fields for ten year scale is accompanied by strengthening of middle flows.

Keywords: Black sea, changeability of circulation intensity, vorticity of wind field, prevailing wind direction.