

## ОТКЛИК ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ НА АТМОСФЕРНЫЙ КВАЗИТРОПИЧЕСКИЙ ЦИКЛОН 25–29 СЕНТЯБРЯ 2005 г.

© С.Г. Демышев, Н.В. Маркова, 2010

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь*

A technique and some results of a prognostic experiment on reconstruction of the Black sea hydrodynamic response to an abnormal meteorological situation are brought to your attention. Mentioned anomalous situation was a quasitropical cyclone developed in a southwest part of the Black sea in the end of September, 2005. Fields of currents, temperature and salinity of the Black sea during the specified period are obtained and analyzed. It is shown that the quasitropical cyclone forcing has led to qualitative changes in the Black sea thermohaline and dynamic structures in comparison with a typical situation during this period. Results of the experiment are confirmed by satellite measurement data.

**Keywords:** the Black sea, anomalous cyclone, numerical experiment, thermohaline structure, sea level, current.

**Введение.** Методология предупреждения чрезвычайных ситуаций на море, связанных с погодными явлениями, — одна из актуальных проблем современности. В представленной работе исследуется аномальная ситуация на Черном море, сложившаяся в период прохождения над юго-западной его частью интенсивного атмосферного циклона 25–29 сентября 2005 г. Он представлял собой мезомасштабный вихрь с характеристиками тропического циклона [1]. Сложная штормовая ситуация, вызванная циклоном, привела к приостановке навигации в юго-западной части Черного моря на несколько суток. Получить информацию о гидрофизических параметрах контактными методами в это время не представлялось возможным. Результаты численных экспериментов и данные спутниковых измерений составляют весь объем сведений о гидродинамической обстановке в Черном море в период прохождения циклона.

Цель настоящей работы — численный прогноз отклика гидрофизических полей Черного моря на прохождение аномального атмосферного вихря в сентябре 2005 г. Расчет проводился на основе численной нелинейной гидродинамической модели Морского гидрофизического института (МГИ) НАН Украины [2, 3]. Атмосферное воздействие в данной модели должно задаваться в виде касательного напряжения трения ветра на поверхности моря. Анализ атмосферных процессов, происходивших в Черноморском регионе в сентябре 2005 г., был проведен в отделе взаимодействия атмосферы и океана МГИ НАН Украины, результаты опубликованы в работе [1]. Полученные в ней значения касательного напряжения трения ветра были использованы нами в качестве атмосферного форсинга (рис. 1).

Для того чтобы оценить действие квазитропического циклона, результаты расчета сравнивались с климатическими полями температуры, солености, вертикальной скорости и скорости течений, полученными ранее в [4]. Для подтверждения достоверности выявленных особенностей в гидрофизических полях проводилось сопоставление со спутниковыми данными [5].

**Постановка задачи. Уравнения модели.** Система уравнений модели в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды имеет вид (ось  $z$  направлена вертикально вниз):

$$u_t - (\xi + f)v + wu_z = -g\rho_0\zeta_x - \frac{1}{\rho_0}(P^l + E)_x + (v_v u_z)_z - v_H \nabla^4 u, \quad (1)$$

$$v_t + (\xi + f)u + wv_z = -g\rho_0\zeta_y - \frac{1}{\rho_0}(P^l + E)_y + (v_v v_z)_z - v_H \nabla^4 v, \quad (2)$$

$$P = g\rho_0\zeta + g \int_0^z \rho d\mu = g\rho_0\zeta + P^l, \quad (3)$$

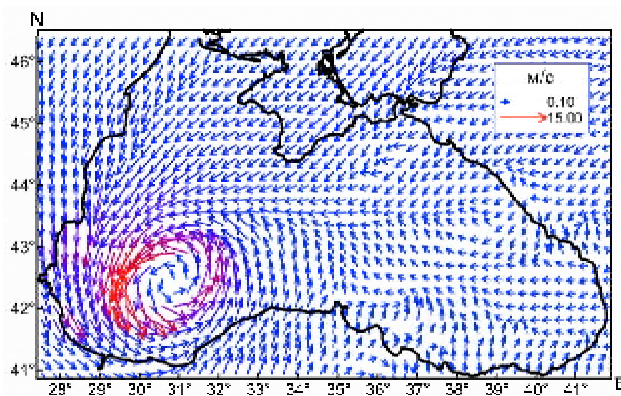


Рис. 1. Поле ветра над Черным морем 26 сентября 2005 г. Горизонтальное разрешение составляет 5×5 км

$$u_x + v_y + w_z = 0, \quad (4)$$

$$\zeta_t + \int_0^H (u_x + v_y) dz = (Pr - Ev) / \rho_1, \quad (5)$$

$$T_t + (uT)_x + (vT)_y + (wT)_z = -\kappa^H \nabla^4 T + (\kappa^T T_z)_z, \quad (6)$$

$$S_t + (uS)_x + (vS)_y + (wS)_z = -\kappa^H \nabla^4 S + (\kappa^S S_z)_z, \quad (7)$$

$$\rho = \varphi(T, S), \quad (8)$$

где  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости, направленные вдоль осей  $x, y, z$  соответственно;  $\xi = v_x - u_y$ ;  $E = \rho_0(u^2 + v^2)/2$ ;  $Pr$  – скорость выпадения осадков;  $Ev$  – скорость испарения воды с поверхности моря;  $\rho_1$  – плотность морской воды. Остальные обозначения общеприняты.

Краевые условия для системы уравнений (1)–(8) имеют следующий вид.

1. На поверхности при  $z = 0$

$$v_x u_z = -\tau^x, \quad v_y v_z = -\tau^y, \quad \kappa^T T_z = Q^T, \quad (9)$$

$$\kappa^S S_z = \frac{Ev - Pr}{\rho_1} S_0 + \beta(S^{cl} - S_0),$$

где  $\tau^x, \tau^y$  – касательное напряжение трения ветра;  $Q^T$  – поток тепла;  $S_0$  – поверхностная соленость;  $S^{cl}$  – климатическая соленость;  $\beta$  – параметр релаксации. Остальные обозначения общеприняты. Смешанное краевое условие для солености (третье соотношение в (9)) вводится из следующих соображений. Специализированные эксперименты показали, что данные об осадках и испарениях содержали большие ошибки, и при интегрировании уравнений модели структура поля солености в верхнем слое моря искажается. Для предотвращения этого эффекта было использовано краевое условие (9), в котором ассимилируется климатическая соленость на поверхности. Релаксационный параметр  $\beta$  означает скорость приспособления модельного поля к климатическому. По результатам расчетов значение этого параметра было выбрано равным  $0,0011574 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ , что соответствует скорости приблизительно 1 м/сут.

2. На дне при  $z = H(x, y)$

$$u = v = w = 0, \quad T_z = S_z = 0. \quad (10)$$

3. На твердых боковых стенках:

– для меридиональных участков границы

$$u = \nabla^2 u = v_x = \nabla^2 v_x = 0, \quad (11)$$

$$T_x = (\nabla^2 T)_x = S_x = (\nabla^2 S)_x = 0;$$

– для зональных участков границы

$$v = \nabla^2 v = u_y = \nabla^2 u_y = 0, \quad (12)$$

$$T_y = (\nabla^2 T)_y = S_y = (\nabla^2 S)_y = 0.$$

4. На участках границы, где вода втекает, используются условия Дирихле:

– для меридиональных участков

$$u = u^p, \quad \nabla^2 u = v_x = \nabla^2 v_x = 0, \quad T = T^p, \quad (13)$$

$$S = S^p, \quad (\nabla^2 T)_x = (\nabla^2 S)_x = 0;$$

– для зональных участков

$$v = v^p, \quad \nabla^2 v = u_y = \nabla^2 u_y = 0, \quad T = T^p, \quad (14)$$

$$S = S^p, \quad (\nabla^2 T)_y = (\nabla^2 S)_y = 0.$$

5. Для верхнебосфорского течения и для Керченского пролива, когда течение направлено из Черного моря в Азовское:

$$v = v^s, \quad \nabla^2 v = u_y = \nabla^2 u_y = 0, \quad T_x = 0,$$

$$S_x = 0, \quad (\nabla^2 T)_y = (\nabla^2 S)_y = 0. \quad (15)$$

В (13)–(15) введены следующие обозначения:  $u^p, v^p, v^s$  – горизонтальные скорости в устьях рек (индекс  $p$ ) и проливах (индекс  $s$ ) соответственно;  $T^p, S^p$  – температура и соленость речных вод.

В качестве начальных полей при  $t = t^0$  взяты трехмерные климатические поля Черного моря, соответствующие 25 сентября 2005 г., полученные в работе [4]:

$$u = u^{cl}(x, y, z), \quad v = v^{cl}(x, y, z), \quad \zeta = \zeta^{cl}(x, y), \quad (16)$$

$$T = T^{cl}(x, y, z), \quad S = S^{cl}(x, y, z),$$

где индекс “cl” означает климатические поля из [4].

Система уравнений (1)–(8) с соответствующими краевыми (9)–(15) и начальными (16) условиями решалась численно.

**Параметры модели.** Расчеты проводились на горизонтальной сетке  $5 \times 5$  км, по вертикали использовалось 45 горизонтов с глубинами 2,5, 5, 10, ... , 30, 40, ... , 60, 75, ... , 120, 145, 170, 200, 250, ... , 700, 800, ... , 1900, 2000, 2050, 2075, 2085, 2095, 2100 м. Шаг по времени 5 мин.

Для задания краевых условий использовались данные о потоках тепла, осадках и испарении на поверхности моря из работы [7], параметры рек и проливов – из справочно-монографического пособия [6]. Касательные напряжения трения ветра на поверхности моря взяты из статьи [1].

Коэффициент горизонтального обмена импульсом принят равным  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^4/\text{с}$ , коэффициент горизонтальной диффузии в уравнениях адвекции–диффузии тепла и соли  $\kappa^H = 10^{17} \text{ см}^4/\text{с}$ . Коэффициенты турбулентного обмена импульсом и турбулентной диффузии тепла и соли по вертикали рассчитывались в соответствии с аппроксимацией Филандера–Пакановского [2], параметры которой получены в результате специализированных численных экспериментов [8].

Интегрирование уравнений модели с указанными начальными и краевыми условиями прово-

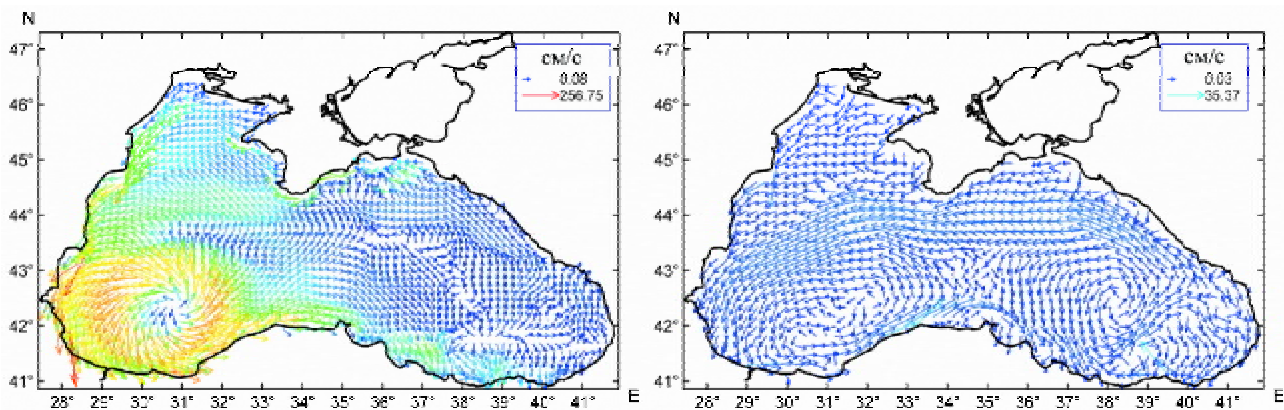


Рис. 2. Течения на верхнем расчетном горизонте 2,5 м 26 сентября 2005 г.: а – при действии аномального атмосферного циклона; б – климатические

дилось для временного интервала с 25 по 29 сентября. Шаг по времени составлял 5 минут.

**Результаты численного прогноза для сентября 2005 г.** В результате действия атмосферного циклона в юго-западной части Черного моря образовался мощный циклонический вихрь. Он усиливался с 25 по 27 сентября и достиг максимальной мощности к 27–28 сентября 2005 г.

Основной эффект действия аномального ветра заключался в мощном подъеме глубинных вод, что привело к качественному изменению структуры пикноклина и структуры поля течений. У юго-западного побережья возник пограничный слой, нарушилась климатическая система течений (рис. 2). Климатические горизонтальные скорос-

ти [4] в области циклонического круговорота составили примерно 20 см/с, во время прохождения атмосферного вихря они, согласно расчетным данным, превысили 350 см/с (рис. 3). В центре вихря температура морской воды понизилась до  $7,8^{\circ}\text{C}$ , а соленость – возросла до  $19,1\text{‰}$  (рис. 4).

В поверхностном слое моря атмосферное воздействие проявилось в течение первых нескольких часов. На горизонте 2,5 м за первые сутки произошла перестройка циркуляции с образованием циклонического круговорота с центром около  $42,5^{\circ}$  с.ш. и  $30,5^{\circ}$  в.д. В зону циклонического вращения вод были вовлечены воды Основного черноморского течения (ОЧТ), начиная от Болгарского побережья (на северо-западе) и до центральной части Турецкого анатолийского побережья (на юго-востоке).

Из анализа данных, приведенных в табл. 1, видно, что максимальных значений горизонтальные скорости в слое до 200 м достигли на 3–4 сутки действия аномального ветра. На глубинах около 500 м наибольшее воздействие проявилось на 3–5 сутки, а в более глубоких слоях (до 2000 м) – на 4–5 сутки действия атмосферного циклона.

В климатическом расчете [4] ОЧТ наблюдалось до глубин 450–500 м. Ниже 500 м структура циркуляции менялась, формировалось несколько

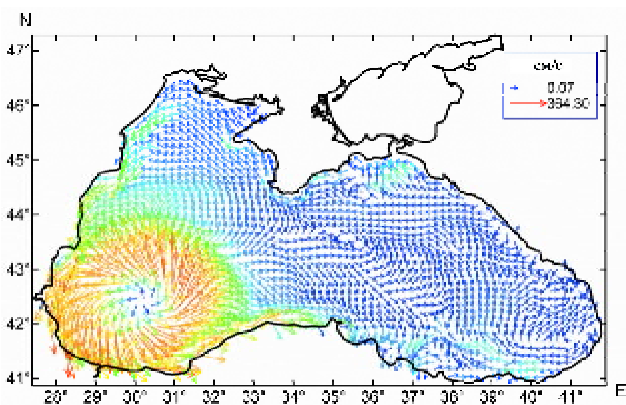


Рис. 3. Поле течений 27 сентября 2005 г.

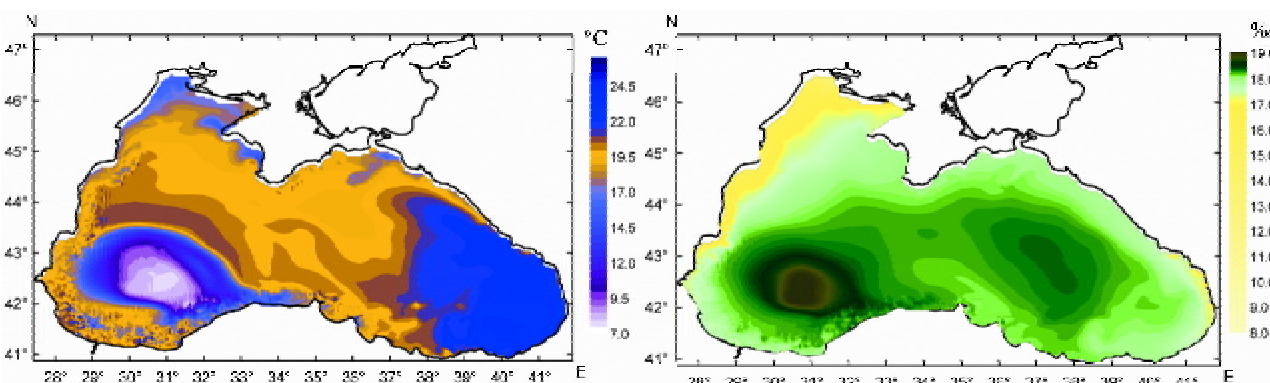


Рис. 4. Поле температуры (а) и поле солёности (б) 28 сентября 2005 г.

циклонических круговоротов [9] со скоростями течений порядка 0,5–1,5 см/с.

Действие ветра привело к образованию зоны мощного апвеллинга в юго-западной части моря. При этом влияние атмосферного вихря оказалось столь велико, что изменилась качественная структура климатических течений и на больших глубинах. Выход более тяжелой воды на поверхность моря поддерживался притоком воды с восточной части моря.

В качестве примера приведены карты течений на горизонте 1000 м (рис. 5). В климатическом поле наблюдалось несколько слабых циклонических вихрей. В результате действия атмосферного циклона система климатических течений разрушилась и в западной части моря сформировался интенсивный циклонический круговорот, который существовал, по крайней мере, на протяжении 4 сут, с 26 по 29 сентября. Он прослеживался в слое 500–1500 м (рис. 5, а).

Вследствие подъема холодных и соленых глубинных вод изменилась структура сезонного пикноклина в западной части моря. К 28 сентября температура поверхностных вод в центре циклонического круговорота составляла уже +8 °С. Рис. 6 демонстрирует выход холодного промежуточного слоя (ХПС) на поверхность моря. Горизонтальные размеры несколько вытянутого вследствие воздействия ОЧТ пятна холодной воды составили примерно 270–280 км в зональном направлении и 160–170 км – в меридиональном. Нижняя граница ХПС в этой зоне с горизонта 100 м поднялась до глубин 30–40 м.

Поверхностная структура поля температуры подтверждается спутниковыми измерениями

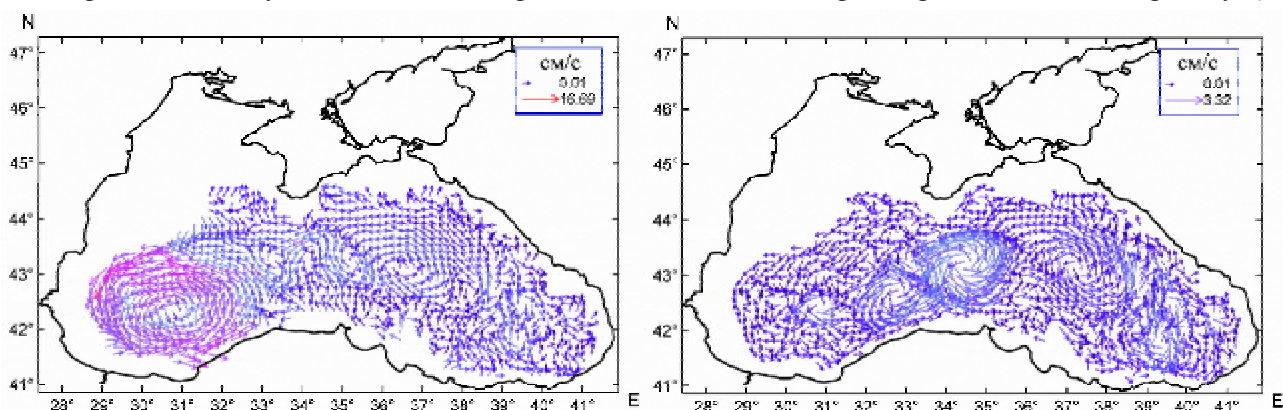


Рис. 5. Поле течений на горизонте 1000 м 28 сентября 2005 г.: а – при действии аномального атмосферного циклона; б – климатическое

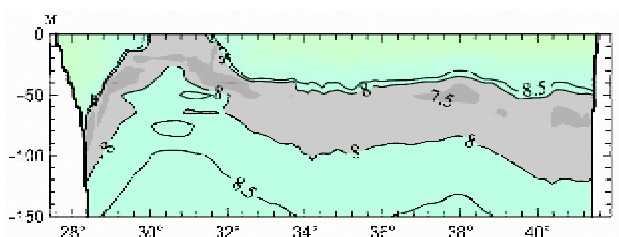


Рис. 6. Поле температуры (°С) 29 сентября 2005 г., зональный разрез вдоль 42° с.ш.

(рис. 7) [5]. Заметим, что в соответствии с наблюдениями область холодной воды с температурой в центре ниже +8 °С сохраняла свое местоположение и ко времени выхода атмосферного циклона за пределы акватории Черного моря.

Подъем холодных и соленых глубинных вод наблюдался не только вблизи поверхности. Так, на горизонте 700 м обнаруживались воды с соленостью, характерной в этом районе для глубин 750–800 м (рис. 8), на горизонте 550 м установлено нахождение вод с глубины 650 м.

Анализ вертикальной скорости в зоне циклона показал, что по сравнению с климатическим полем произошли качественные изменения. Действие атмосферного квазитропического циклона столь велико, что вертикальная скорость в центральной части круговорота имела большое отрицательное значение. Ее структура отражает прямое действие ветра и не коррелирует с известным соотношением квазигеострофического баланса (рис. 9). Зона опускания вод наблюдалась в прибрежной зоне. Она была компенсационной по отношению к области апвеллинга и, видимо, обусловила формирование прибрежного пограничного слоя в полях температуры и солености.

Сопоставление количественных характеристик приведено в табл. 1 и 2. В табл. 2 даны значения параметров на горизонте 2,5 м для точки (42,5° с.ш., 30,5° в.д.), относящейся к центральной области циклона, поскольку максимальное отклонение от климатических значений (за исключением поля течений) отмечалось в центральной части образовавшегося вихря. Для горизонтальной скорости приведен диапазон, минимальное значение которого приходится на центральную, а

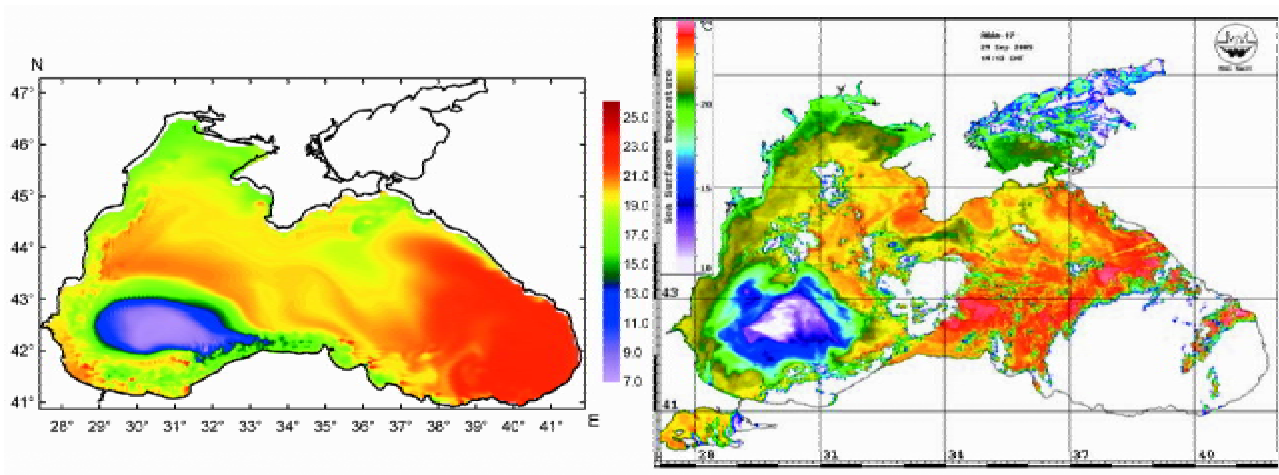


Рис. 7. Поле температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) на верхнем расчетном горизонте 2,5 м 29 сентября 2005 г.: *a* – по модельным; *b* – по спутниковым данным

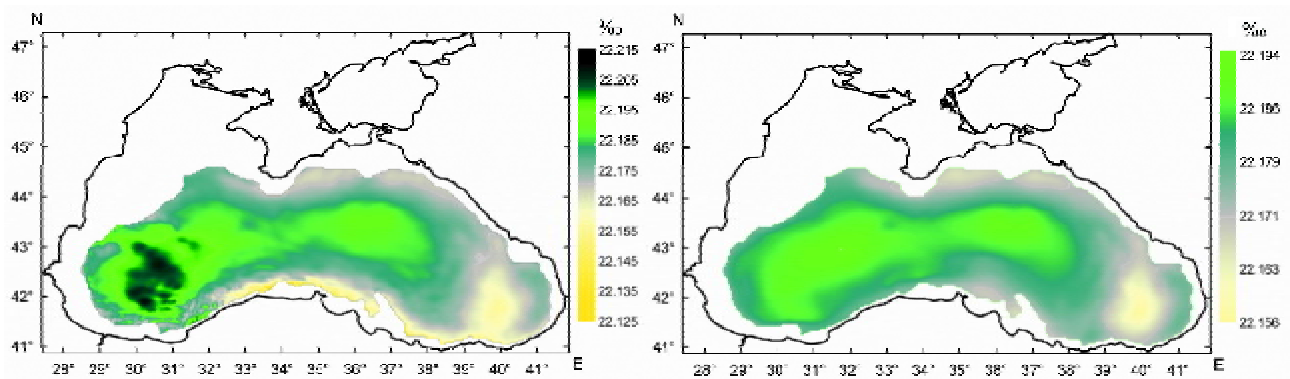


Рис. 8. Поле солёности ( $\text{‰}$ ) на горизонте 700 м 29 сентября 2005 г.: *a* – при действии аномального атмосферного циклона; *b* – климатическое

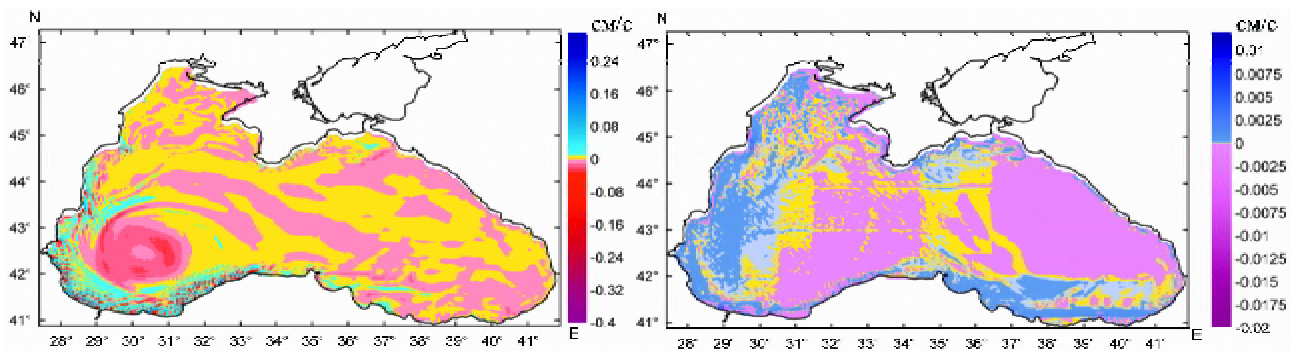


Рис. 9. Поле вертикальной скорости (см/с) на горизонте 4 м 27 сентября 2005 г.: *a* – при действии аномального атмосферного циклона; *b* – климатическое

**Таблица 1. Изменение горизонтальных скоростей (см/с) на разных горизонтах в зоне действия циклона в сентябре 2005 г. Выделены максимальные значения**

Горизонт, м	Климат*	25.09	26.09	27.09	28.09	29.09
2,5	5–20	50–100	100–200	200–350	100–50	<50
200	1–6	<10	5–10	10–20	10–20	10–15
500	0,5–1,5 (0,5–1,0)	0,5–5	2–7	5–12	4–10	4–12
1000	<0,5 (0,5–1,5)	0,5–1,5	2–6	4–8	4–12	4–12
2000	<0,5 (0,5–1,5)	0,5–1,5	1–3	3–9	4–12	4–13

\* Здесь и в табл. 2 приведены значения климатических параметров, рассчитанные на 25 сентября, в климатическом расчете в последующие 4 сут они изменяются незначительно.

**Таблица 2. Изменение основных гидродинамических параметров в поверхностном слое моря в зоне действия циклона в сентябре 2005 г.**

Параметр	Климат	25.09	26.09	27.09	28.09	29.09
$T, ^\circ\text{C}$	21,8	21,8	21,4	14,1	8,0	7,8
$S, \text{‰}$	18,30	18,30	18,30	18,55	19,05	19,10
$\zeta, \text{см}$	6,0	-9,5	-13,5	-25,0	-30,0	-27,0
$\zeta^d, \text{см}$	-5,5	-6,5	-10,0	-17,4	-23,0	-21,4
$w, \text{см/с}$	От $-2,2 \cdot 10^{-5}$ до $+3,3 \cdot 10^{-5}$	-	$-5,7 \cdot 10^{-3}$	$-7,6 \cdot 10^{-3}$	$-8,5 \cdot 10^{-3}$	$-2,2 \cdot 10^{-3}$

*Примечание.* Выделены экстремальные значения.

максимальное — на периферийную часть циклонического образования.

Как видно из табл. 2, действие квазитропического циклона привело к охлаждению поверхностной воды на  $14^\circ\text{C}$  и осолонению на  $0,8\text{‰}$ . Геоострофические поверхностные ( $\zeta^d$ ) и придонные скорости возросли по абсолютному значению в 4–5 раз. Самые большие количественные изменения наблюдались в значениях вертикальной скорости, которая возросла на 2 порядка, что привело к качественной перестройке гидрофизических полей Черного моря при прохождении атмосферного вихря. Заметим, что в силу инертности системы наибольшее охлаждение и осолонение верхних слоев моря произошло к 29 сентября 2005 г., когда мощность атмосферного циклона уже начала уменьшаться. Согласно спутниковым данным, пятно холодной воды в рассматриваемом районе сохранялось еще на протяжении трех недель: так, 23 октября 2005 г. вода в зоне существования циклона была холоднее окружающих вод на  $1–2^\circ\text{C}$ .

**Выводы.** Основной эффект действия аномального ветра заключался в мощном подъеме глубинных вод, что привело к качественному изменению структуры поля течений. У юго-западного побережья в полях плотности и скорости возник пограничный слой, в западной части моря сформировался интенсивный циклонический круговорот, который существовал с 26 по 29 сентября.

Основная качественная особенность по сравнению с климатическими полями наблюдалась в поле температуры в западной части моря. После двух суток действия аномального ветра ХПС вышел на поверхность моря, что сопровождалось подъемом более соленых глубинных вод.

Отметим количественные изменения в гидрофизических полях в период прохождения атмосферного вихря. Значения климатических горизонтальных скоростей [4] составляли примерно  $20\text{ см/с}$ , во время прохождения атмосферного вихря они, согласно расчетным данным, превысили  $350\text{ см/с}$ . В центре вихря температура морской воды понизилась до  $7,8^\circ\text{C}$ , а соленость возросла до  $19,1\text{‰}$ .

Результаты проведенной работы согласуются с доступными данными спутниковых наблюдений поверхности моря [5].

Таким образом, воздействие квазитропического циклона привело к качественному изменению термохалинной и динамической структур Черного моря по сравнению с типичной ситуацией в этот период.

1. Ефимов В.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А. Численное моделирование квазитропического циклона над Черным морем // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2007. — 43, № 6. — С. 1–21.
2. Демьшев С.Г., Кортаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке С. — М.: ИВМ, 1992. — С. 163–231.

3. Демьшев С.Г., Кныш В.В., Коротаев Г.К. Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря // Мор. гидрофиз. журн. — 2002. — № 3. — С.12–26.
4. Демьшев С.Г., Иванов В.А., Маркова Н.В., Черкесов Л.В. Построение поля течений в Черном море на основе вихреразрешающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солёности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика. — 2007. — Вып. 15. — С. 215–226.
5. Морской портал НККАУ. — <http://dvs.net.ua>
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А.И. Симонова, Э.Н. Альмана. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. — С.103–262.
7. Staneva J.V., Stanev E.V. Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets. Intercomparison study for the Black sea // Oceanologia. — 1998. — 21 (3). — P. 383–417.
8. Демьшев С.Г., Кныш В.В., Коротаев Г.К. Моделирование сезонной изменчивости температурного режима верхнего деятельного слоя Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2004. — 40, № 2. — С. 259–270.
9. Демьшев С.Г., Иванов В.А., Маркова Н.В. Анализ климатических полей Черного моря ниже основного пикноклина, полученных на основе усвоения архивных данных температуры и солёности в численной гидродинамической модели // Мор. гидрофиз. журн. — 2009. — № 1. — С. 3–15.

*Поступила в редакцию 13.02.2009 г.*

*С.Г. Демьшев, Н.В. Маркова*

### **ОТКЛИК ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ НА АТМОСФЕРНЫЙ КВАЗИТРОПИЧЕСКИЙ ЦИКЛОН 25–29 СЕНТЯБРЯ 2005 г.**

Излагается методика проведения и результаты прогностического эксперимента по реконструкции гидродинамического отклика Черного моря на аномальную метеорологическую ситуацию (квазитропический циклон), сложившуюся в юго-западной части моря в конце сентября 2005 г. Получены и проанализированы поля течений, температуры и солёности Черного моря в упомянутый период. Показано, что действие квазитропического циклона привело к качественным изменениям термохалинной и динамической структур Черного моря по сравнению с типичной ситуацией в этот период. Результаты эксперимента подтверждаются данными спутниковых измерений.

**Ключевые слова:** Черное море, аномальный циклон, численный эксперимент, термохалинная структура, уровень моря, течение.

*С.Г. Демьшев, Н.В. Маркова*

### **ВІДГУК ГІДРОФІЗИЧНИХ ПОЛІВ ЧОРНОГО МОРЯ НА АТМОСФЕРНИЙ КВАЗИТРОПІЧНИЙ ЦИКЛОН 25–29 ВЕРЕСНЯ 2005 р.**

Викладено методику проведення й результати прогностичного експерименту з реконструкції гідродинамічного відгуку Чорного моря на аномальну метеорологічну ситуацію (квазитропічний циклон), що склалась у південно-західній частині моря наприкінці вересня 2005 р. Отримано й проаналізовано поля течій, температури й солоності Чорного моря у зазначений період. Показано, що дія квазітропічного циклону привела до якісних змін термохалінної і динамічної структур Чорного моря порівняно з типовою ситуацією в цей період. Результати експерименту підтверджено даними супутникових вимірів.

**Ключові слова:** Чорне море, аномальний циклон, чисельний експеримент, термохалінна структура, рівень моря, течія.