

Численное моделирование водообмена через Керченский пролив для различных типов атмосферных воздействий© 2017 В. В. Фомин^{1,*}, Д. И. Лазоренко¹, И. Н. Фомина²¹*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*²*Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова, Севастополь, Россия***E-mail: fomin.dntmm@gmail.com*

Поступила в редакцию 02.11.2016 г. После доработки 26.12.2016 г.

Исследуются особенности водообмена через Керченский пролив для различных типов атмосферных воздействий. В качестве входных данных используются результаты численного моделирования течений и уровня моря в Азово-Черноморском бассейне на неравномерной расчетной сетке со сгущением в проливе. Определены диапазоны направлений ветра, при которых водообмен через пролив наиболее интенсивен. Установлено, что при генерации поля ветра атмосферным циклоном интенсивность суммарного водообмена через пролив увеличивается при уменьшении скорости перемещения циклона. Результаты расчетов расходов воды в проливе для реальных синоптических ситуаций согласуются с оценками, полученными по натурным данным.

Ключевые слова: Азовское море, Черное море, Керченский пролив, ветровые течения, уровень моря, водообмен, численное моделирование.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-4-82-93

Введение. Керченский пролив – важнейшая судоходная магистраль и один из наиболее богатых рыбопромысловых районов Азово-Черноморского бассейна. Водообмен через Керченский пролив играет определяющую роль в формировании гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов в прилегающих районах Азовского и Черного морей.

Результаты исследования особенностей водообмена через Керченский пролив на основе натурных наблюдений изложены в [1 – 3]. Здесь для оценки расходов воды использовались измерения течений в северной узости Керченского пролива (разрез порт Крым – порт Кавказ). Анализ результатов расчетов показал, что интенсификация водообмена через Керченский пролив происходит в период штормов, вызванных прохождением циклонов или действием устойчивых ветров, в которых преобладает меридиональная составляющая скорости. Сложность расчетов расходов воды по натурным данным обусловлена как эпизодичностью измерений скорости течений, так и их отсутствием по всему сечению пролива. Кроме того, измерения в проливе выполняются, как правило, только при благоприятных погодных условиях. Эти обстоятельства приводят к необходимости использования для оценок водообмена через Керченский пролив результатов гидродинамического моделирования.

Моделированию динамики вод Керченского пролива посвящен ряд публикаций [4 – 9], в которых используется расчетная область с двумя жидкими

границами – северной и южной. В зависимости от направления ветра и перепадов уровня моря на жидких границах применяются те или иные граничные условия, вносящие искажения в результаты моделирования. В настоящей работе проблема жидких границ решается за счет использования в качестве расчетной области всего Азово-Черноморского бассейна. В такой постановке задача требует значительных объемов вычислений и для ее решения привлекаются высокопроизводительные вычислительные системы.

Цель данной работы – исследование водообмена через северную узость Керченского пролива для различных типов атмосферных воздействий, лежащих в диапазоне синоптической изменчивости, на основе модельных данных.

Численная модель. Для расчетов полей течений и уровня моря в Азово-Черноморском бассейне применяется численная гидродинамическая модель *Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries (ADCIRC)*. Подробное описание модели и результаты ее использования приведены в работах [10 – 13]. Валидация *ADCIRC* по данным наблюдений за уровнем Азовского моря проводилась в [14, 15]. Исходные уравнения модели имеют вид

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta + \frac{P_a}{g\rho_0} \right] + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0 H} + \frac{M_x}{H}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta + \frac{P_a}{g\rho_0} \right] + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0 H} + \frac{M_y}{H}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

здесь x, y, t – горизонтальные координаты и время; U, V – средние по глубине компоненты вектора скорости течений по осям x и y соответственно; η – отклонение свободной поверхности моря от невозмущенного состояния; f – параметр Кориолиса; g – ускорение силы тяжести; P_a – атмосферное давление; ρ_0 – средняя плотность морской воды; $H = h + \eta$ – динамическая глубина, h – глубина моря; $M_x = A_h \Delta q_x$, $M_y = A_h \Delta q_y$ – компоненты горизонтальной турбулентной вязкости, A_h – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости, Δ – оператор Лапласа по переменным x, y ; $q_x = UH$, $q_y = VH$ – компоненты вектора полных потоков.

Компоненты касательных напряжений в (1), (2) определяются следующими выражениями:

$$\tau_{sx} = \rho_a C_a W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \quad \tau_{sy} = \rho_a C_a W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \quad (4)$$

$$\tau_{bx} = \rho_0 C_d U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \tau_{by} = \rho_0 C_d V \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (5)$$

где ρ_a – плотность воздуха; W_x, W_y – компоненты вектора скорости приводного ветра; C_a, C_d – коэффициенты поверхностного и донного трения.

Численный алгоритм *ADCIRC* основан на методе конечных элементов, использующем треугольные элементы и линейные базисные функции. Для

предотвращения образования вычислительного шума при численном интегрировании системы (1) – (3) последнее уравнение записывается в виде так называемого уравнения *Generalized Wave Continuity Equation (GWCE)* [11]

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \tau_0 G = 0,$$

где $G \equiv \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}$; τ_0 – произвольный положительный параметр. После некоторых дифференциальных преобразований уравнение *GWCE* приводится к следующему эквивалентному виду:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = 0, \quad (6)$$

где

$$J_x = -q_x \frac{\partial U}{\partial x} - q_y \frac{\partial U}{\partial y} + f q_y - \frac{g}{2} \frac{\partial \eta^2}{\partial x} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0} + M_x + \tau_0 q_x + U \frac{\partial \eta}{\partial t} - gH \frac{\partial \eta}{\partial x},$$

$$J_y = -q_x \frac{\partial V}{\partial x} - q_y \frac{\partial V}{\partial y} - f q_x - \frac{g}{2} \frac{\partial \eta^2}{\partial y} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0} + M_y + \tau_0 q_y + V \frac{\partial \eta}{\partial t} - gH \frac{\partial \eta}{\partial y}.$$

На практике оптимальное значение параметра τ_0 выбирается на основе численных экспериментов. Ориентиром для его выбора является условие $1 < \tau_0 / \tau_{\max} \leq 10$, в котором $\tau_{\max} = \max \left| C_d \sqrt{U^2 + V^2} / H \right|$.

Результаты численных экспериментов. Численное моделирование выполнялось для всего Азово-Черноморского бассейна на неструктурированной расчетной сетке из ~158 тыс. узлов. Размер сторон конечных элементов изменялся в пределах от 60 м в Керченском проливе до 4900 м в глубоководной части Черного моря. Коэффициенты трения в выражениях (4), (5) задавались формулами $C_a = 0,001 \left(0,75 + 0,067 \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \right)$, $C_d = gn^2 / H^{1/3}$, где $n = 0,025$ – параметр шероховатости Маннинга. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости $A_h = 10 \text{ м}^2/\text{с}$, шаг интегрирования по времени составлял 3 с. С учетом вышеизложенных ограничений весовой множитель τ_0 в уравнении (6) принимался равным 0,005. Для упрощения задачи вклад речного стока при моделировании гидродинамических полей не учитывался.

Положение разреза порт Крым – порт Кавказ показано на рис. 1. Длина разреза L приблизительно равна 4 км. Расчеты водообмена проводились по вычисленным гидродинамическим полям следующим образом. Вначале с помощью линейной интерполяции определялись компоненты вектора полных потоков и уровень моря на разрезе. Затем интегрированием вдоль прямой L вычислялись мгновенный расход воды (Q), средняя скорость течений (V_N) и средний уровень моря (SL):

$$Q(t) = \int_L q_N(l,t) dl, \quad V_N(t) = \frac{Q(t)}{\int_L H(l,t) dl}, \quad SL(t) = \frac{1}{L} \int_L \eta(l,t) dl,$$

где $q_N = \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \cos(\varphi_N - \varphi)$ – проекция вектора полных потоков на нормаль к прямой L , $\varphi_N = 52^\circ$ – направление положительной нормали к разрезу, φ – направление вектора полных потоков. Здесь и далее все углы отсчитываются относительно оси x , направленной на восток против часовой стрелки. Таким образом, при $Q > 0$ суммарный поток воды направлен в Азовское море (прямой поток), при $Q < 0$ – в Черное море (обратный поток). Для прямого и обратного потоков используются обозначения Q_A и Q_B соответственно.

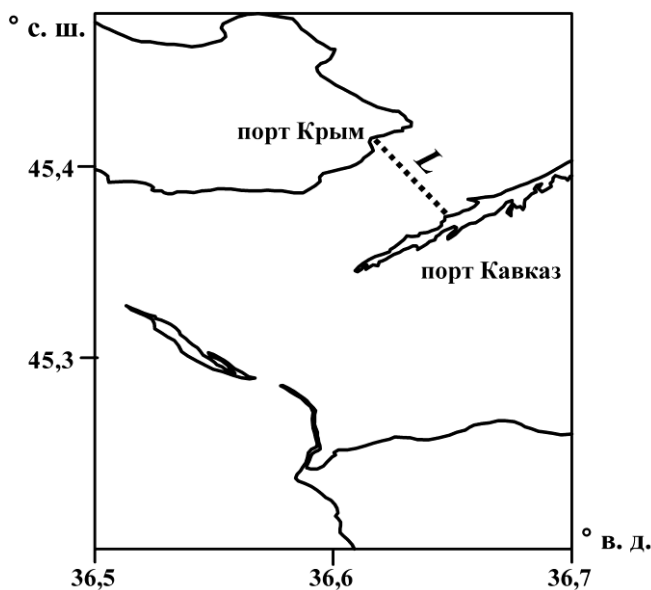


Рис. 1. Схема северной узости Керченского пролива. Пунктирная линия – разрез порт Крым – порт Кавказ

В первом цикле численных экспериментов анализировалось влияние направления (θ) однородного по пространству ветра на водообмен через Керченский пролив. Задача решалась с нулевыми начальными условиями. Предполагалось, что при $t > 0$ на поверхность бассейна начинает действовать ветер, скорость которого за 12 ч линейно возрастает от 0 до W_0 и далее остается неизменной. Для каждого фиксированного θ общее время интегрирования составляло 48 ч, что соответствует характерному времени действия устойчивых ветров над Азово-Черноморским бассейном.

На рис. 2 для различных скоростей ветра W_0 показаны зависимости расхода воды от направления ветра при $t = 48$ ч. Как видно, представленные кривые имеют хорошо выраженный синусоидальный характер. Максимальным прямым потокам соответствует диапазон углов $60^\circ \leq \theta \leq 105^\circ$, максимальным обратным потокам – диапазон углов $240^\circ \leq \theta \leq 285^\circ$. Минимальным значени-

ям потоков, а также смене их направления соответствуют диапазоны углов $165^\circ \leq \theta \leq 175^\circ$ и $345^\circ \leq \theta \leq 355^\circ$. Увеличение W_0 вызывает интенсификацию водообмена через пролив. Так, при изменении W_0 в диапазоне 5 – 20 м/с максимальные значения Q_A и Q_B увеличиваются в 5,7 и 6,6 раза соответственно. Связь максимальных значений прямого и обратного потоков со скоростью ветра W_0 в указанном диапазоне можно аппроксимировать следующими линейными уравнениями:

$$\max Q_A = 1013W_0 - 2008, \quad \max Q_B = -1207W_0 + 3324.$$

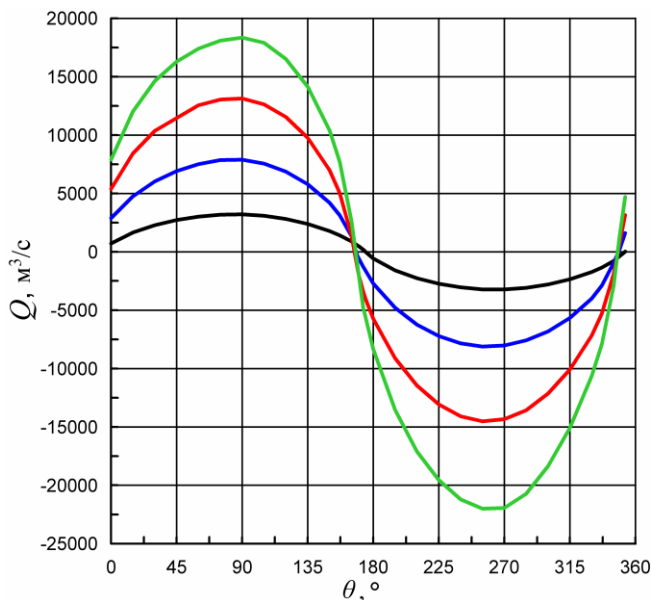


Рис. 2. Зависимости Q от θ при $t = 48$ ч и различных значениях W_0 . Черная кривая соответствует $W_0 = 5$ м/с; синяя – $W_0 = 10$ м/с; красная – $W_0 = 15$ м/с; зеленая – $W_0 = 20$ м/с

На рис. 3 при $W_0 = 10$ м/с представлены зависимости Q от времени для характерных значений θ . Кривые В1 и В2 соответствуют максимальным значениям Q (направление ветра близко к меридиональному). Видно, что в интервале времени 0 – 12 ч происходит монотонное увеличение Q до ± 7500 м³/с с последующей стабилизацией. На этих кривых видны незначительные колебания с инерционным периодом, обусловленные вращением Земли. Кривые С1 – С4 соответствуют минимальным значениям Q , когда направление ветра близко к зональному. На этих кривых также прослеживаются инерционные колебания, но их размах существенно больше по сравнению с кривыми В1 и В2.

Таким образом, направление ветра существенно влияет на водообмен в Керченском проливе. Выделяются диапазоны направлений ветра с максимальными и минимальными значениями Q_A и Q_B . При направлении ветра, близком к зональному, водообмен минимален. В этом случае возрастает роль инерционных колебаний. При всех рассмотренных значениях W_0 качественный вид зависимости Q от времени не меняется.

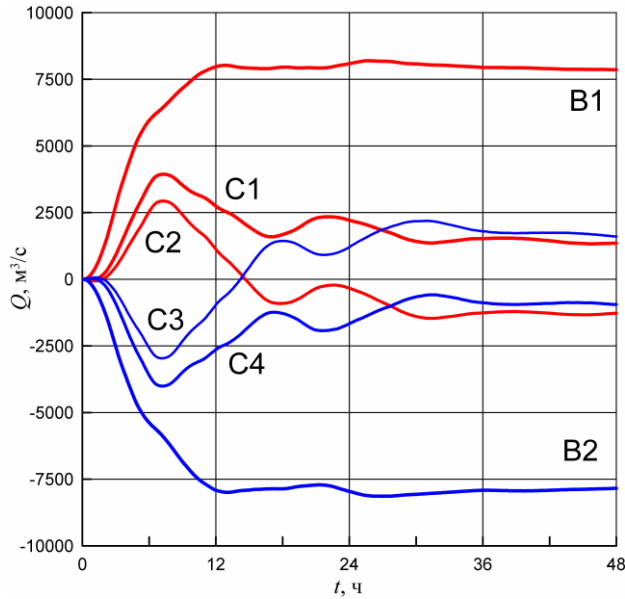


Рис. 3. Зависимости Q от времени при $W_0=10$ м/с. Кривая B1 соответствует $\theta = 75^\circ$; кривая B2 – $\theta = 240^\circ$; кривая C1 – $\theta = 165^\circ$; кривая C2 – $\theta = 175^\circ$; кривая C3 – $\theta = 355^\circ$; кривая C4 – $\theta = 345^\circ$

Анализировались также особенности водообмена через Керченский пролив, возникающие после резкого прекращения действия ветра. Как и в предыдущих расчетах, скорость ветра за первые 12 ч линейно увеличивалась от 0 до W_0 и далее оставалась постоянной в течение 36 ч. После этого она принималась равной нулю и интегрирование проводилось еще на 72 ч модельного времени.

На рис. 4 показаны зависимости Q от времени после прекращения действия ветра ($48 \text{ ч} \leq t \leq 120 \text{ ч}$). Анализ кривых показывает, что в течение первых суток происходят резкие изменения Q , обусловленные внезапным прекращением действия ветра и сопровождаемые сменой знака Q . Далее возникает режим свободных колебаний с затуханием.

При меридиональном направлении ветра (кривые C1 и C2) период этих колебаний τ равен 10 – 12 ч. При зональных ветрах (кривые C3 и C4) период колебаний близок к инерционному. В обоих случаях размах колебаний Q относительно невелик. В средних течениях эти колебания проявляются в виде флуктуаций V_N , равных $\sim 0,02 - 0,03$ м/с. Можно предположить, что период τ индуцирован продольными сейшевыми колебаниями Азовского моря.

В следующем цикле численных экспериментов рассматривалась ситуация, когда над Азово-Черноморским бассейном распространяется атмосферный циклон. Скорость ветра в циклоне рассчитывалась по формуле градиентного ветра

$$W_g(r) = \left[\frac{r}{\rho_a} \frac{dP_a}{dr} + \left(\frac{fr}{2} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{fr}{2},$$

где $r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$ – расстояние от центра циклона (x_c, y_c) до точки (x, y) , в которой определяется W_g ; $r_x = x - x_c$; $r_y = y - y_c$. Атмосферное давление P_a задавалось выражением из работы [4]

$$P_a(r) = \begin{cases} P_0 - \delta P_a \cos^2\left(\frac{\pi r}{2R}\right) & \text{при } r < R, \\ P_0 & \text{при } r \geq R, \end{cases}$$

где P_0 – фоновое значение атмосферного давления; δP_a – перепад давления между центром и периферией циклона; R – радиус циклона. Предполагалось, что направление ветра в приповерхностном слое атмосферы за счет трения отклоняется от касательных к изобарам на угол $\gamma = 20^\circ$ против часовой стрелки, а его скорость меньше скорости градиентного ветра. С учетом этих допущений компоненты вектора скорости ветра в приповерхностном слое атмосферы определялись при $\alpha = 90^\circ + \gamma$, $\mu = 0,7$ следующим образом:

$$W_x = -\frac{\mu W_g}{r} (r_x \sin \alpha + r_y \cos \alpha), \quad W_y = \frac{\mu W_g}{r} (r_x \cos \alpha - r_y \sin \alpha).$$

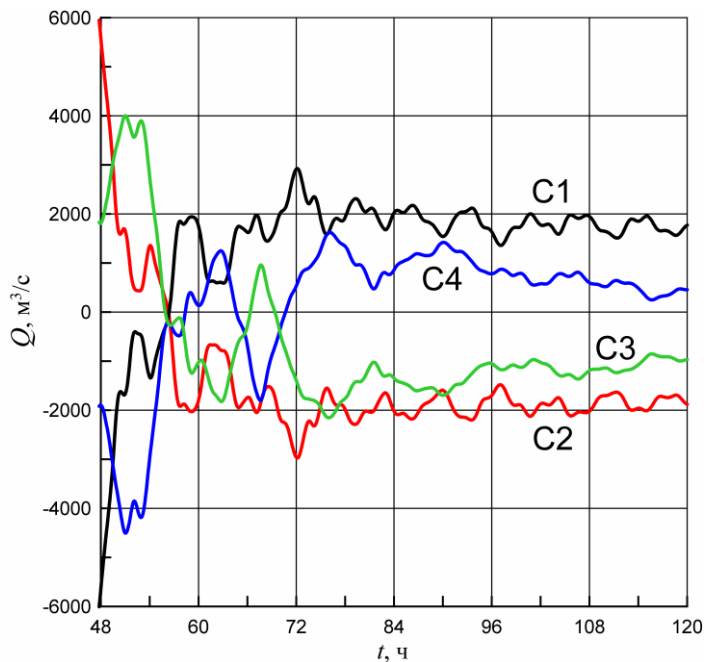


Рис. 4. Зависимости Q от времени при $W_0 = 10$ м/с после прекращения действия ветра. Кривая C1 соответствует $\theta = 90^\circ$; кривая C2 – $\theta = 270^\circ$; кривая C3 – $\theta = 0^\circ$; кривая C4 – $\theta = 180^\circ$

Расчеты проводились при следующих параметрах циклона: $R = 300$ км, $\delta P_a = 10$ гПа, $x_0 = 22^\circ$ в. д., $y_0 = 46,75^\circ$ с. ш. Циклон двигался в восточном направлении по зональной траектории ($x_c = x_0 + c t$, $y_c = y_0$) со скоростью c . Общее время интегрирования составляло 10 сут.

Зависимости Q от времени при различных скоростях перемещения циклона показаны на рис. 5, $a - в$. На рис. 5, $г$ приведены зависимости от времени суммарного расхода воды между бассейнами:

$$Q_s(t) = \int_0^t Q(\xi) d\xi.$$

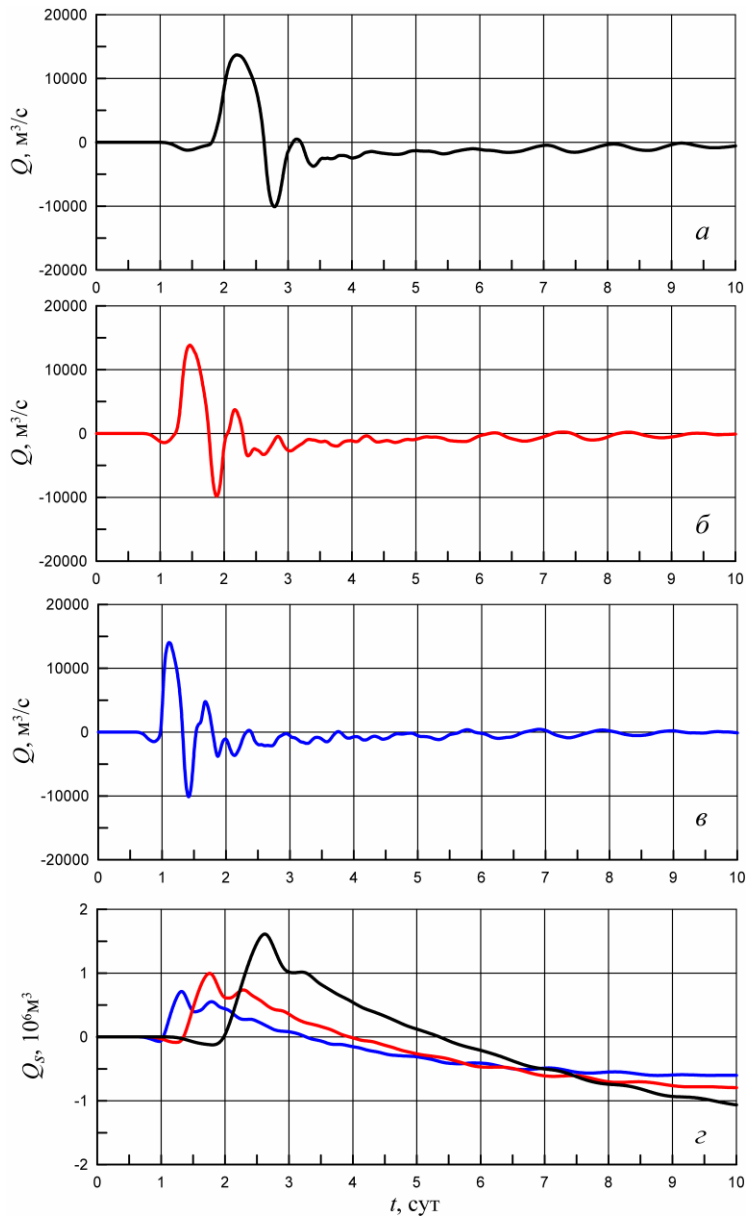


Рис. 5. Зависимости Q и Q_s от времени при различных скоростях движения циклона: $a - Q$ при $c = 20 \text{ м/с}$; $б - Q$ при $c = 30 \text{ м/с}$; $в - Q$ при $c = 40 \text{ м/с}$; $г - Q_s$ при $c = 20 \text{ м/с}$ (черная кривая), $c = 30 \text{ м/с}$ (красная кривая), $c = 40 \text{ м/с}$ (синяя кривая)

Поскольку во всех трех случаях траектория циклонов одинакова, кривые Q для разных значений c подобны – имеют одинаковое количество максимумов и минимумов. Увеличение скорости перемещения циклона проявляется в сжатии кривых на графике по оси времени. Вследствие этого уменьшается время воздействия циклона на акваторию Керченского пролива. В итоге это приводит к ослаблению суммарного водообмена в проливе, что проявляется в уменьшении $|Q_S|$.

Заключительный цикл расчетов посвящен оценкам водообмена через Керченский пролив для реальных синоптических ситуаций, которые имели место в Азово-Черноморском бассейне. В качестве атмосферного форсинга использовались поля скорости ветра и атмосферного давления из мезомасштабной метеорологической модели *WRF* (*ecobase.org.ua*) с пространственным разрешением 7 км и дискретностью по времени 3 ч. Расчеты проводились для 5 месячных интервалов времени с разными синоптическими условиями.

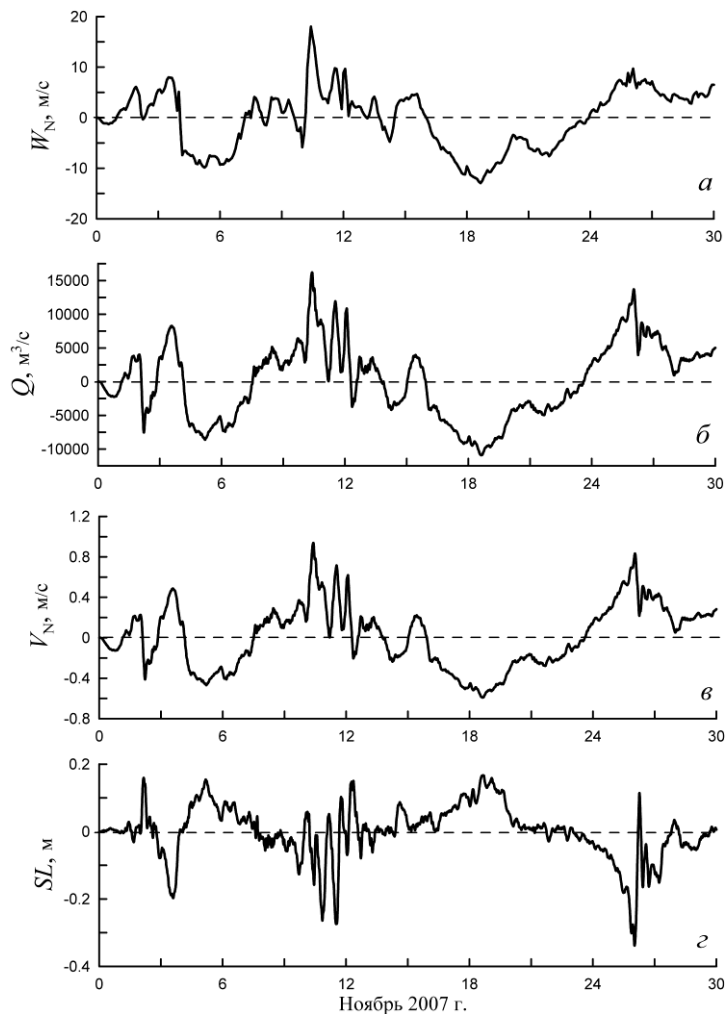


Рис. 6. Зависимости W_N , Q , V_N , SL от времени для ноября 2007 г.

В качестве примера на рис. 6 показаны результаты расчетов для ноября 2007 г. Как известно, 11 ноября 2007 г. в Азово-Черноморском бассейне произошел мощный шторм, который привел к катастрофическим последствиям в Керченском проливе. На рис. 6, а показана проекция скорости ветра на нормаль к разрезу $W_N = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \cos(\varphi_N - \theta)$. Для вычисления W_N использовались средняя скорость и среднее направление ветра на разрезе. Сопоставление кривых показывает, что изменения расхода воды (рис. 6, б) и средней скорости течений (рис. 6, в) происходят синфазно с изменениями проекции скорости ветра на нормаль к разрезу (рис. 6, а). При этом средний уровень моря изменяется в противофазе с указанными выше характеристиками. Такой ход зависимостей является общим для всех 5 интервалов времени.

В таблице приведены экстремальные значения величин Q , V_N и SL в северной узости Керченского пролива для рассматриваемых месячных интервалов времени. Видно, что наибольшие положительные значения Q (черноморский поток) достигают 12000 – 16000 м³/с, наибольшие отрицательные значения Q (азовский поток) – 11000 м³/с. Средние скорости течений из Черного моря в Азовское составляют 0,9 м/с. При этом течения из Азовского моря в Черное имеют несколько меньшие скорости (~0,6 м/с). Наибольшие спады и подъемы уровня моря находятся в пределах –0,4 ... 0,4 м. Приведенные в таблице данные согласуются с результатами расчетов водообмена с использованием натуральных измерений из работы [3], где показано, что максимальные расходы воды в период штормов составляют 11000 – 15000 м³/с при средней скорости течений ~45 – 47 см/с.

Экстремумы расхода воды Q , нормальной составляющей средней скорости течений V_N и среднего уровня моря SL в северной узости Керченского пролива для месячных интервалов времени

Расчетные месяцы	max Q , м ³ /с	min Q , м ³ /с	max V_N , м/с	min V_N , м/с	max SL , м	min SL , м
Ноябрь 2007 г.	16220	–10909	0,93	–0,59	0,17	–0,34
Март 2013 г.	12880	–9700	0,79	–0,52	0,23	–0,38
Июль 2013 г.	6604	–8043	0,38	–0,43	0,14	–0,13
Сентябрь 2013 г.	9543	–7586	0,56	–0,41	0,17	–0,17
Сентябрь 2014 г.	14990	–1392	0,92	–0,61	0,41	–0,39

Закключение. Выполнены расчеты водообмена через северную узость Керченского пролива для различных типов атмосферных воздействий. В качестве входных данных использовались результаты численного моделирования течений и уровня моря для всего Азово-Черноморского бассейна на неструктурированной расчетной сетке со сгущением в Керченском проливе. Анализ результатов расчетов позволил сделать следующие выводы.

Направление ветра θ существенно влияет на величину расходов воды Q . Диапазоны $60^\circ \leq \theta \leq 105^\circ$ и $240^\circ \leq \theta \leq 285^\circ$ соответствуют максимальным

значениям $|Q|$, диапазоны $165^\circ \leq \theta \leq 173^\circ$ и $345^\circ \leq \theta \leq 353^\circ$ – минимальным значениям $|Q|$. После прекращения действия ветра в Керченском проливе возникают сейшеобразные осцилляции Q с периодами 10 – 12 ч.

При распространении над Керченским проливом атмосферного циклона интенсивность водообмена определяется скоростью его перемещения c . При уменьшении c увеличивается время воздействия циклона на акваторию Керченского пролива, что приводит к усилению суммарного водообмена в проливе.

Величины $|Q|$ для реальных синоптических ситуаций могут достигать 11000 – 16000 м³/с, что согласуется с результатами расчетов Q , полученными по натурным данным.

Расчеты проводились на вычислительном кластере Морского гидрофизического института.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и грид-технологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Альтман Э.Н.* К вопросу об изменчивости расходов воды в Керченском проливе (по натурным наблюдениям) // Тр. ГОИН. – 1976. – Вып. 132. – С. 17 – 28.
2. *Альтман Э.Н.* Динамика вод Керченского пролива // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 291 – 328. – URL: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-t4-chernoe-more-vyp-1-gidrometeorologicheskie-usloviya-1991.pdf> (дата обращения: 10.08.2016).
3. *Дьяков Н.Н., Фомина И.Н., Тимошенко Т.Ю., Полозок А.А.* Особенности водообмена через Керченский пролив по данным натурных наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ, 2016. – Вып. 1. – С. 62 – 67.
4. *Гидрометеорологические условия морей Украины.* Том 1. Азовское море. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – 402 с.
5. *Иванов В.А., Шапиро Н.Б.* Моделирование течений в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – Вып. 10. – С. 207 – 232.
6. *Ivanov V.A., Cherkesov L.V., Shul'ga T.Y.* Extreme deviations of the sea level and the velocities of currents induced by constant winds in the Azov Sea // *Physical Oceanography*. – 2011. – 21, Iss. 2. – P. 98 – 105. – doi:10.1007/s11110-011-9107-5
7. *Матшиов Г.Г., Чикин А.Л.* Исследование ветровых течений в Керченском проливе с помощью математического моделирования // Вестник Южного научного центра РАН. – 2012. – 8, № 2. – С. 27 – 32. – URL: http://ssc-ras.ru/files/files/27-32_Matishov1_.pdf (дата обращения 10.08.2016).
8. *Тучковенко Ю.С.* Численная математическая модель циркуляции вод в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. – Вып. 6. – С. 223 – 232.

9. Фомин В.В., Полозок А.А., Фомина И.Н. Моделирование циркуляции вод Азовского моря с учетом речного стока // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 1. – С. 16 – 28. – doi:10.22449/0233-7584-2015-1-16-28
10. Luettich R.A., Westerink J.J. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model Version 44.XX. – 2004. – URL: http://www.unc.edu/ims/adcirc/publications/2004/2004_Luettich.pdf (дата обращения: 26.06.2017).
11. Luettich Jr. R.A., Westerink J.J., Scheffner N.W. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts, and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Dredging research program technical report DRP-92-6. – Vicksburg: U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1992. – 137 p. – URL: <http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA261608> (дата обращения: 10.08.2016).
12. Dietrich J.C., Zijlema M., Westerink J.J. et al. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations // Coast. Engineer. – 2011. – 58, Iss. 1. – P. 45 – 65. – doi:10.1016/j.coastaleng.2010.08.001
13. Sebastian A.G., Proft J.M., Dietrich J.C. et al. Characterizing hurricane storm surge behavior in Galveston Bay using the SWAN + ADCIRC model // Ibid. – 2014. – № 88. – P. 171 – 181. – doi:10.1016/j.coastaleng.2014.03.002
14. Фомин В.В., Полозок А.А. Технология моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море на неструктурированных сетках // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. – Вып. 27. – С. 139 – 145.
15. Fomin V.V., Polozok A.A., Kamyshnikov R.V. Wave and storm surge modelling for Sea of Azov with use of SWAN +ADCIRC // Geoinformation Sciences and Environmental Development: New Approaches, Methods, Technologies. Collection of articles. – Rostov-on-Don: Publishing house SSC RAS, 2014. – P. 111 – 116.

Numerical modeling of water exchange through the Kerch Strait for various types of the atmospheric impact

V. V. Fomin^{1,*}, D. I. Lazorenko¹, I. N. Fomina²

¹Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

²Sevastopol Branch of the N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia

*e-mail: fomin.dntmm@gmail.com

Features of water exchange through the Kerch Strait are examined for various types of the atmospheric impact. The results of numerical modeling of currents and sea level in the Azov – Black Sea basin on the non-uniform computational grid concentrated in the strait are used as the input data. The ranges of wind directions at which water exchange through the strait is the most intense are identified. It is revealed that the wind field generated by an atmospheric cyclone intensifies total water exchange through the strait with decrease of the cyclone movement speed. The results of calculating water flow in the strait for real synoptic situations are consistent with the estimates obtained by the other authors from the field data.

Keywords: Sea of Azov, Black Sea, Kerch Strait, wind currents, sea level, water exchange, numerical simulation.