



УДК 551.465(262.5)

© 2009

Д. В. Алексеев, академик НАН Украины В. А. Иванов, Е. В. Иванча,
член-корреспондент НАН Украины Л. В. Черкесов

Моделирование ветровых волн и течений в Каркинитском заливе Черного моря

Методом математичного моделювання досліджується формування полів течій та вітрових хвиль у Каркінітській затоці Чорного моря. Гідродинамічні процеси спричиняються дією типових для даного регіону північно-східного, західного і південно-західного вітрів. Використовуються модифікований варіант моделі морської динаміки РОМ та спектральна модель вітрового хвилювання SWAN. Встановлено, що при різних напрямках вітру висоти хвиль і хвильові швидкості змінюються більше ніж у 1,5 рази і виявляються мінімальними при північно-західному вітрі й максимальними — при південно-східному. Максимальні значення спадів-нагнів і швидкостей стаціонарних течій близькі за абсолютною величиною за різних вітрових умов.

Каркинитский залив — залив Черного моря между северо-западным берегом Крымского полуострова и берегом материка. Вдаётся в сушу на 118,5 км. Глубины в его западной части достигают 36 м, в восточной — 10 м (рис. 1). Каркинитский залив испытывает возрастающее антропогенное воздействие. Поэтому одной из первоочередных задач рационального освоения природных ресурсов и управления техногенными системами данного региона становится изучение происходящих в нем гидродинамических процессов. В данном сообщении представлены результаты математического моделирования циркуляции вод и волнения в Каркинитском заливе при типичных для черноморского региона ветровых ситуациях. При этом учитывается влияние течений на волны [1].

1. Математическая постановка задачи. Для расчета ветровой циркуляции воспользуемся баротропным вариантом [2] модели РОМ [3], который базируется на нелинейных уравнениях движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении гидростатики:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2)$$

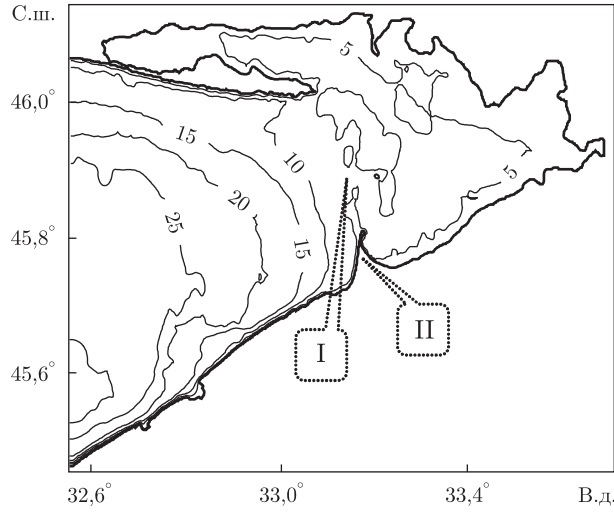


Рис. 1. Батиметрия Каркинитского залива (I – Бакальская банка, II – Бакальская коса)

$$p = p_a + g\rho(\eta - z), \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где u, v, w – компоненты вектора скорости течений вдоль осей x, y, z , направленных соответственно на восток, север и вертикально вверх; t – время; $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z$; f – параметр Кориолиса; $\rho = 1015 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды; p – давление; p_a – атмосферное давление; A_M – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости, вычисляемый по формуле Смагоринского [4]; K_M – коэффициент вертикальной турбулентной вязкости [5]; g – ускорение свободного падения; $\eta(x, y, t)$ – уровень моря.

На свободной поверхности ($z = \eta(x, y, t)$) должны быть выполнены кинематическое и динамические условия [3]:

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad \rho K_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = \rho_a C_A (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} \{W_x, W_y\}, \quad (5)$$

где $\rho_a = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха; $\{W_x, W_y\}$ – компоненты вектора скорости ветра; $C_A = k^2 \{14,56 - \ln[(W_x^2 + W_y^2)/W_0^2]\}^{-2}$ – коэффициент поверхностного трения [6]; $W_0 = 1 \text{ м/с}$; $k = 0,4$ – постоянная Кармана.

На дне ($z = -H(x, y)$) равна нулю нормальная составляющая скорости, а касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [3]:

$$w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} = 0, \quad \rho K_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = \rho C_D (u^2 + v^2)^{1/2} \{u, v\}, \quad (6)$$

где $C_D = k^2 [\ln(z_b/z_0)]^{-2}$ – коэффициент донного трения; z_b – расстояние от дна до расчетной точки; $z_0 = 0,001 \text{ м}$ – масштаб шероховатости донной поверхности.

На боковых границах морского бассейна выполняются условия прилипания:

$$u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0. \quad (7)$$

В начальный момент времени движения жидкости отсутствуют, а свободная поверхность горизонтальна:

$$u = 0, \quad v = 0, \quad \eta = 0. \quad (8)$$

Для расчета параметров ветрового волнения будем использовать спектральную модель SWAN [7], в основе которой лежит уравнение баланса волновой энергии в спектральной форме:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\omega N)}{\partial \omega} + \frac{\partial(c_\varphi N)}{\partial \varphi} = \frac{S}{\omega}, \quad (9)$$

где $N = E(t, x, y, \omega, \varphi)/\omega$ — плотность волнового действия; $E(t, x, y, \omega, \varphi)$ — частотно-угловой спектр волнения; $c_x = c_{gx} + u_s$; $c_y = c_{gy} + v_s$; $\{u_s, v_s\}$ — компоненты скорости течений на поверхности моря; $c_g = (1/2)\sqrt{(g/k_w) \operatorname{th}(k_w D)(1 + 2k_w D/\operatorname{sh}(2k_w D))}$; $\{c_{gx}, c_{gy}\} = c_g \{k_{wx}/k_w, k_{wy}/k_w\}$; $\mathbf{k}_w = \{k_{wx}, k_{wy}\}$ — волновой вектор; $k_w = \sqrt{k_{wx}^2 + k_{wy}^2}$; $D = H + \eta$ — динамическая глубина; $\omega = \sqrt{gk_w \operatorname{th}(k_w D)}$ — частота волн; φ — направление распространения волн; $c_\omega = \frac{\partial \omega}{\partial D} \left(\frac{\partial D}{\partial t} + u_s \frac{\partial D}{\partial x} + v_s \frac{\partial D}{\partial y} \right) - c_g \left(k_{wx} \frac{\partial u_s}{\partial n} + k_{wy} \frac{\partial v_s}{\partial n} \right)$; $c_\varphi = -\frac{1}{k_w} \left(\frac{\partial \omega}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial m} + k_{wx} \frac{\partial u_s}{\partial m} + k_{wy} \frac{\partial v_s}{\partial m} \right)$; n, m — координаты, отсчитываемые вдоль направления распространения волн φ и по нормали к нему соответственно; $S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib}$ — функция источника; S_{in} — источник энергоснабжения волн ветром; S_{nl} — энергия нелинейных взаимодействий спектральных гармоник; S_{wc} — диссипация энергии вследствие обрушения волновых гребней; S_{bf} — диссипация энергии вследствие донного трения; S_{dib} — энергия обрушения волн на критических глубинах.

На твердых боковых границах $E = 0$. По угловой переменной используется условие периодичности $E(\varphi = 0) = E(\varphi = 2\pi)$, а по частотной — $E(\omega_{\min}) = E(\omega_{\max}) = 0$.

Решение уравнения (8) дает возможность получить ряд спектральных характеристик волнения [7]: высоту значительных волн

$$H_s = 4 \sqrt{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi}, \quad (10)$$

среднеквадратичное значение максимальной придонной орбитальной скорости

$$U_{orb} = \sqrt{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{2\omega^2}{g^2 \operatorname{sh}^2(k_w D)} E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi} \quad (11)$$

и среднее направление распространения волн

$$\varphi_w = \operatorname{arctg} \left[\frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \sin \varphi E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \cos \varphi E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi} \right]. \quad (12)$$

2. Метод решения. В дальнейшем ограничимся рассмотрением установившихся гидродинамических процессов в Каркинитском заливе, вызываемых стационарным однородным по пространству ветром. Тогда алгоритм расчета полей течений и волн заключается в следующем. На первом этапе с помощью гидродинамической модели (1)–(8), в которой производится переход от z - к σ -координате ($\sigma = (z - \eta)/(H + \eta)$), рассчитываются поля скоростей установившихся течений $\{u, v, w\}$ и уровень моря η . Для повышения пространственного разрешения расчеты гидродинамических полей проводятся на трех вложенных сетках: первая из них покрывает все Черное море; вторая — охватывает только северо-западную часть; третья сетка покрывает Каркинитский залив с разрешением 197×281 м, а ее открытая граница проходит вдоль $32,546^\circ$ в.д. (см. рис. 1). При этом количество уровней по вертикали в каждом случае равнялось 15.

На втором этапе определяются параметры ветрового волнения с использованием модели (9)–(12). Также как и в гидродинамической модели, расчеты проводятся на трех вложенных сетках. Чтобы учесть влияние течений на волны, при расчетах на каждой сетке используются полученные на ней поля скоростей течений на свободной поверхности $\{u_s, v_s\}$ и уровень моря η . Угловое разрешение при определении спектра волнения составляло 5° . По частотной координате использовалась сетка с 25 узлами, охватывающая частотный интервал 0,05–1,00 Гц.

3. Анализ результатов численных экспериментов. В течение года над Черным морем преобладают ветры северо-восточной четверти, составляющие 35–40% годовой повторяемости всех направлений. Второе место занимают западные ветры и ветры юго-западной четверти. Повторяемость их в течение года 25–30% [8]. Рассмотрим формирование полей течений и волнения в Каркинитском заливе под воздействием стационарных и однородных по пространству полей ветра с типичными для черноморского региона направлениями и скоростью 15 м/с.

При северо-восточном ветре после выхода гидродинамических процессов на стационарный режим по всей акватории Каркинитского залива наблюдается понижение уровня моря от $-0,04$ м на юго-западе до $-0,5$ м на востоке (рис. 2, а). Течения на свободной поверхности в открытой части акватории направлены по ветру (см. рис. 2, б). В мелководных областях данная закономерность нарушается. Это проявляется в узком струйном течении, которое распространяется от северо-восточной оконечности залива до Бакальской банки, огибает ее с запада и далее вдоль южного берега направляется на юго-запад. При этом скорости здесь максимальны и достигают 0,7 м/с. В придонном слое в центральной части залива имеют место направленные против ветра течения со скоростями, не превышающими 0,3 м/с (см. рис. 2, в). Западнее и восточнее Бакальской банки образуются вытянутые вдоль южного берега антициклонические круговороты. На северо-западе и северо-востоке акватории располагаются существенно меньшие по размерам и интенсивности циклонические круговороты.

Высоты значительных волн возрастают с увеличением разгона с северо-востока на юго-запад от 0,2 до 2,2 м (рис. 3, а). Восточнее Бакальской банки прослеживается область локального усиления волнения до 1,2 м, связанная с выходом волн на мелководье. Волновые скорости достигают максимальных значений 0,3 м/с над Бакальской банкой и у южного побережья Каркинитского залива (см. рис. 3, б). При этом имеют место локальные отклонения направления распространения волн от направления ветра.

Рассмотрим следующий по повторяемости тип ветровых ситуаций, когда над акваторией Черного моря преобладает западный ветер. Его продолжительное воздействие приводит

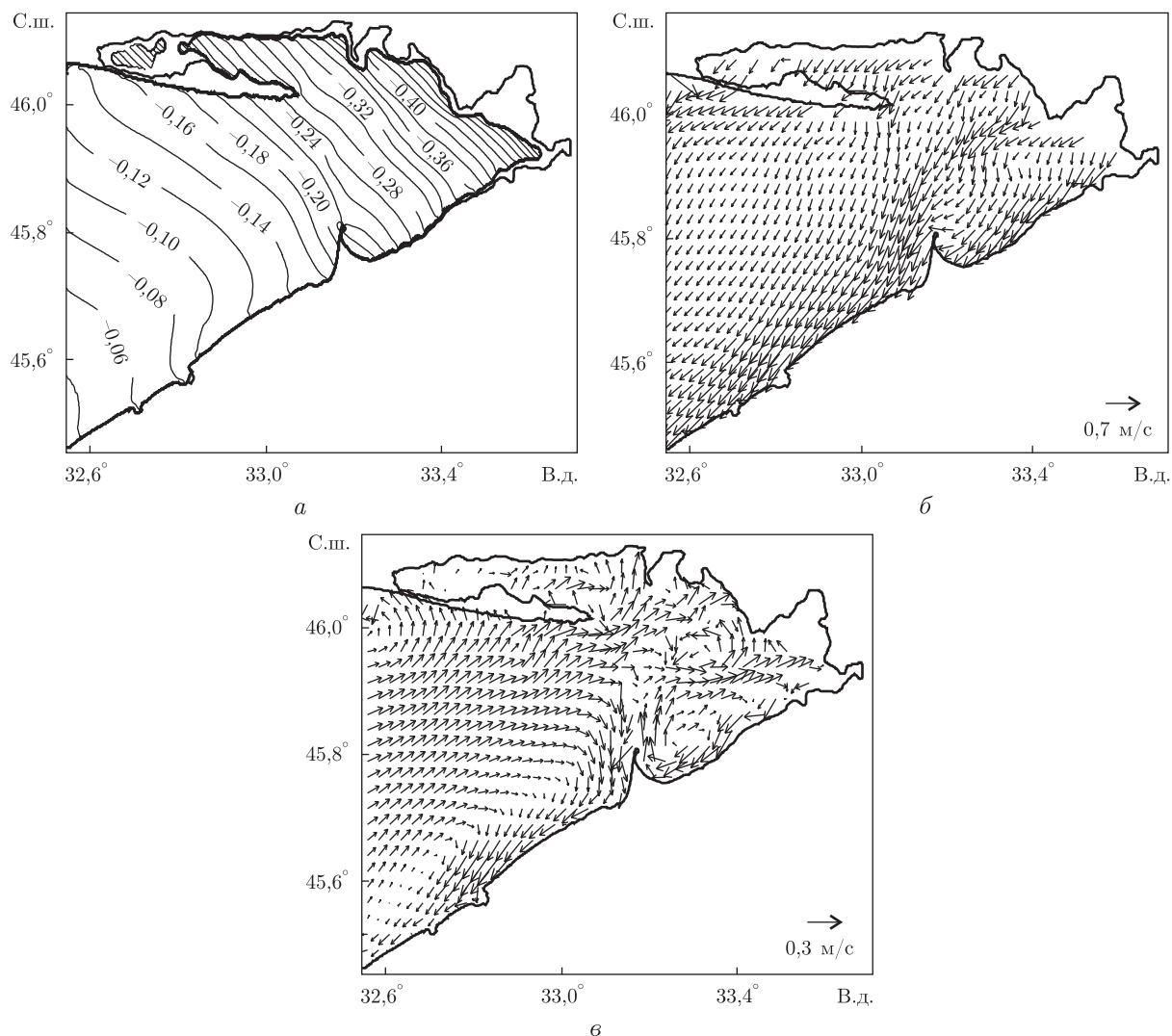


Рис. 2. Уровень моря (а), скорости течений на поверхности (б) и на расстоянии 1 м от дна (в) при северо-восточном ветре со скоростью 15 м/с

к установившемуся во времени нарастанию уровня моря от $-0,04$ до $0,40$ м с запада на восток. Поверхностные течения направлены по ветру только в северо-западной части Каркинитского залива, где их скорости максимальны и достигают $0,8$ м/с. По мере приближения к Бакальской банке они отклоняются к юго-востоку. Это же направление характерно для менее интенсивных течений в юго-западной части залива. Достигнув берега, они распространяются на северо-восток вдоль береговой черты. К востоку от Бакальской банки скорости на поверхности имеют максимальные значения у южного и северного берегов, а в их направлениях преобладает восточная составляющая. У дна, в отличие от случая северо-восточного ветра, компенсирующие противотечения оказываются существенно смещенными в пространстве относительно поверхностных течений.

При данной ветровой ситуации разгон волн перед вхождением в Каркинитский залив достаточно велик, поэтому их значительные высоты в западной части акватории достигают $3,2$ м, а затем с уменьшением глубины убывают до $1,6$ м перед Бакальской банкой. За ней,

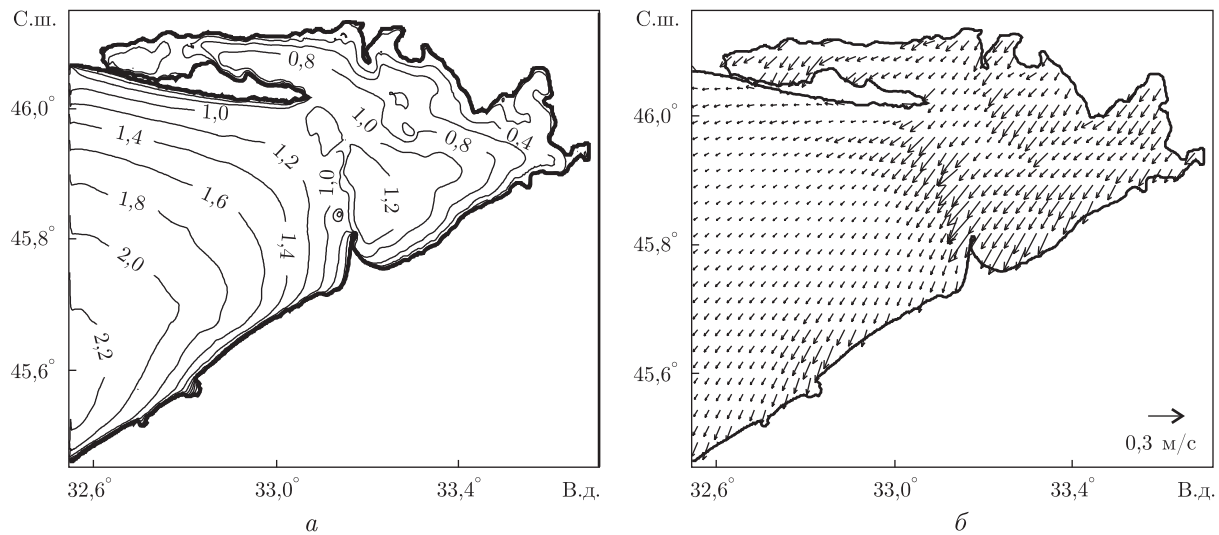


Рис. 3. Высоты значительных волн (а) и придонные орбитальные скорости (б) при северо-восточном ветре со скоростью 15 м/с

вследствие экранирующего эффекта, как и в случае северо-восточного ветра, высоты волн составляют 1,2–0,2 м. В распределении направлений волн преобладает зональная составляющая и только восточнее Бакальской косы вблизи берега заметной становится меридиональная (южная) составляющая. Волновые скорости увеличиваются с запада до Бакальской банки, достигают над ней максимальных значений 0,4 м/с и затем резко уменьшаются в восточной части залива.

При юго-западном ветре нагоны от 0,04 м на юго-западе до 0,50 м на востоке наблюдаются по всей акватории Каркинитского залива.

Поверхностные течения, как и при северо-восточном ветре, направлены преимущественно по ветру. Наибольшей интенсивности (0,7 м/с) они достигают у юго-западного побережья и над Бакальской банкой. В придонном слое противотечения со скоростями, не превышающими 0,3 м/с, отчетливо выражены в северо-западной части залива.

Высоты значительных волн на открытой границе Каркинитского залива достигают 3,4 м, перед Бакальской банкой быстро уменьшаются от 2,4 до 1,4 м и восточнее банки не превышают 1,4 м. Волновые скорости, наоборот, постепенно усиливаются с запада на восток, достигая над банкой максимальных значений 0,5 м/с, и затем резко уменьшаются. При этом направления распространения волн существенно не меняются и совпадают с направлением ветра.

Таким образом, при трех наиболее повторяющихся в черноморском регионе направлениях ветра (северо-восточном, западном и юго-западном) имеют место близкие по абсолютной величине максимальные значения сгонов-нагонов и скоростей стационарных течений. Высоты волн и волновые скорости изменяются более чем в 1,5 раза и оказываются минимальными при северо-восточном ветре и максимальными — при юго-западном.

1. Фомин В. В. Численная модель ветровых течений в мелководном бассейне, учитывающая ветровое волнение // Эколог. безопасность прибреж. и шельф. зон и комплекс. использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2005. – Вып. 11. – С. 353–368.
2. Фомин В. В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Науч. тр. УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246–255.

3. *Blumberg A. F., Mellor G. L.* A description of three dimensional coastal ocean circulation model // Coastal and Estuarine Sci. – 1987. – **4**. – P. 1–16.
4. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // Monthly Weather Rev. – 1963. – **91**. – P. 99–164.
5. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. of Geophys. and Space Phys. – 1982. – No 20. – P. 851–875.
6. *Hsu S. A.* A mechanism for the increase of wind stress coefficient with wind speed over water surface: A parametric model // J. Phys. Oceanogr. – 1986. – **16**. – P. 144–150.
7. *SWAN* technical documentation. – Netherlands: Delft Univ. Technol., 2007. – 98 p.
8. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия.* – Ленинград: Гидрометеориздат, 1991. – 430 с.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 13.02.2009

D. V. Alekseev, Academician of the NAS of Ukraine **V. A. Ivanov**, **E. V. Ivancha**,
Corresponding Member of the NAS of Ukraine **L. V. Cherkesov**

Simulation of wind waves and currents in the Karkinitsky bay of the Black Sea

The formation of current and wind wave fields in the Karkinitsky bay of the Black Sea is studied by using the method of numerical simulation. Hydrodynamical processes are caused by the effect of north-west, west, and south-west winds which are typical of the region. A modified version of the sea dynamic model POM and the spectral model SWAN for wind waves are used. Influence of currents on waves is taken into account. To improve the space resolution, the calculations of hydrodynamical fields are carried out on three nested grids. It is obtained that the wave heights and velocities change by more than 1.5 times for different wind directions and appear minimal for the north-west wind and maximal for the south-west one. The maximal values of surges and velocities of stationary currents are close by absolute values under various wind conditions.