



УДК 551.465(262.5)

Д. В. Алексеев

## Исследование характеристик ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря от Одессы до устья Днепра при различных ветровых условиях

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Л. В. Черкесовым)

*С использованием спектральной численной модели SWAN исследовано ветровое волнение в прибрежной зоне Черного моря от Одессы до устья Днепра. Высокое пространственное разрешение достигнуто за счет применения технологии вложенных сеток. Проанализированы параметры волн, генерируемых ветрами восьми основных румбов различной силы. Установлено, что в открытой части акватории наиболее интенсивное волнение возникает при юго-восточном, южном и юго-западном ветрах, а наименее интенсивное — при северо-восточном, северном и северо-западном. Направление волн существенно отклоняется от направления ветра только при западном и восточном ветрах. В Днепро-Бугском лимане максимальные высоты волн при ветрах различной направленности и одинаковой силы достаточно близки, изменяется лишь район их пространственной локализации.*

Прибрежная зона Черного моря от Одессы до устья Днепра имеет важное транспортное, рыбопромысловое и рекреационное значение. Здесь существует несколько больших заливов, среди которых наиболее значимыми для экономики Украины являются Одесский залив и Днепро-Бугский лиман (рис. 1). Одесский залив шириной около 9 км простирается с северо-востока на юго-запад [1, т. 2]. Днепро-Бугский лиман образован вытянутым в зональном направлении Днепровским лиманом (длина — 55 км, максимальная ширина — 16,7 км) и ориентированным в меридиональном направлении Бугским лиманом (длина — 47 км, ширина — до 11 км) [1, т. 1]. С Черным морем Днепро-Бугский лиман соединяется через Кинбурнский пролив шириной 3,6 км.

В настоящее время наиболее полную информацию о характеристиках ветрового волнения в море можно получить с использованием методов численного моделирования. Выполненные для исследуемого региона работы по изучению параметров волн имеют недостаточное пространственное разрешение для описания морфологических особенностей заливов и лиманов [2, 3]. В данном сообщении представлены результаты моделирования ветрового

© Д. В. Алексеев, 2014

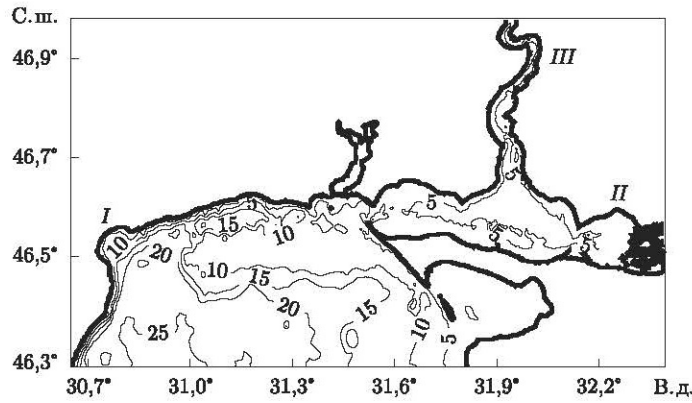


Рис. 1. Батиметрия прибрежной зоны Черного моря от Одессы до устья Днепра, м. Римскими цифрами обозначены: I — Одесский залив; II — Днепровский лиман; III — Бугский лиман

волнения в прибрежной зоне от Одессы до устья Днепра с высоким пространственным разрешением с использованием спектральной модели SWAN [4] (Simulating Waves Near shore) для ветров восьми основных румбов разной силы.

**1. Математическая постановка задачи и метод решения.** Спектральная модель ветрового волнения SWAN [4] базируется на уравнении баланса волновой энергии

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_{gx}N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_{gy}N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_{\omega}N)}{\partial \omega} + \frac{\partial(c_{\varphi}N)}{\partial \varphi} = \frac{S}{\omega}. \quad (1)$$

Здесь  $N = E(t, x, y, \omega, \varphi)/\omega$  — плотность волнового действия, где  $E(t, x, y, \omega, \varphi)$  — частотно-угловой спектр волнения,  $t$  — время,  $x$  и  $y$  — горизонтальные координаты, отсчитываемые на восток и север соответственно;  $\{c_{gx}, c_{gy}\} = c_g \left\{ \frac{k_x}{k}, \frac{k_y}{k} \right\}$ ;  $c_g = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{k}} \operatorname{th}(kD) \left( 1 + \frac{2kD}{\operatorname{sh}(2kD)} \right)$  ( $\{k_x, k_y\}$  — компоненты волнового вектора,  $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ,  $D(x, y)$  — глубина моря,  $g$  — ускорение свободного падения);  $\omega = \sqrt{gk \operatorname{th}(kD)}$  — частота волн;  $\varphi$  — направление распространения волн;  $c_{\omega} = \frac{\partial \omega}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial t}$ ;  $c_{\varphi} = -\frac{1}{k} \frac{\partial \omega}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial m}$  ( $m$  — координата, отсчитываемая по нормали к  $\varphi$ );  $S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib}$  — функция источника ( $S_{in}$  — источник энергоснабжения волн ветром [5],  $S_{nl}$  — энергия нелинейных взаимодействий спектральных гармоник [6],  $S_{wc}$  — диссипация энергии вследствие обрушения волновых гребней [4],  $S_{bf}$  — диссипация энергии за счет донного трения [4],  $S_{dib}$  — энергия обрушения волн на критических глубинах [4]).

При решении уравнения (1) на твердых боковых границах полагается  $E = 0$ . По угловой переменной используется условие периодичности  $E(\varphi = 0) = E(\varphi = 2\pi)$ , по частотной переменной для  $\omega_{\min}$  и  $\omega_{\max}$  — условие  $E(\omega_{\min}) = E(\omega_{\max}) = 0$ .

Зная плотность волнового действия  $N(\omega, \varphi)$ , а значит, и частотно-угловой спектр  $E(\omega, \varphi)$ , получаем оценки ряда спектральных характеристик волнения [4]:

высоту значительных волн (далее высота волн)

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

среднее направление распространения волн

$$\varphi = \arctg \left( \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \sin \varphi E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi / \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \cos \varphi E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi \right) \quad (3)$$

и средний период волн

$$\tau = 2\pi \left( \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \omega E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi / \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} E(\omega, \varphi) d\omega d\varphi \right)^{-1}. \quad (4)$$

Расчеты проводились с использованием параллельного варианта модели SWAN, установленного на вычислительном кластере Морского гидрофизического института НАН Украины. Валидация модели выполнена, согласно публикации [7], с использованием рядов приводного ветра и колебаний уровня моря за 1998–1999 гг., полученных на морской платформе “Толицыно-4”, которая расположена на северо-западном шельфе Черного моря. Для повышения пространственного разрешения волновые поля рассчитывались на трех вложенных сетках, покрывавших Азово-Черноморский бассейн, северо-западную часть Черного моря и прибрежную зону от Одессы до устья Днестра (см. рис. 1) с разрешением  $4,6 \times 4,5$  км,  $1,6 \times 1,4$  км и  $257 \times 253$  м соответственно. Угловое разрешение модели составляло  $10^\circ$ . По частотной координате использовалась сетка с 32 узлами в диапазоне частот от 0,04 до 2 Гц.

**2. Анализ результатов численных экспериментов.** С целью определения характеристик ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря от Одессы до устья Днестра был проведен ряд численных экспериментов для постоянных ветров восьми основных румбов (западного, юго-западного, южного, юго-восточного, восточного, северо-восточного, северного и северо-западного) со скоростями, м/с: 10, 15, 20, 25. При анализе результатов численного моделирования будем отдельно рассматривать открытую часть акватории и Днестро-Бугский лиман, в силу значительной изолированности их друг от друга.

Величины и пространственное распределение параметров ветрового волнения определяются силой ветра, разгоном волн и их рефракцией на особенностях береговой линии и дна. В открытой части акватории Черного моря от Одессы до устья Днестра значительный разгон имеют волны, приходящие с юга, юго-востока и юго-запада. Они характеризуются наибольшими высотами, которые достигают максимальных значений 1,6, 3,1, 4,4 м и 5,5 м у южной границы рассматриваемой акватории при южных ветрах со скоростями, м/с: 10, 15, 20, 25 соответственно. По мере приближения к берегам высоты убывают, причем у восточных и северо-восточных берегов это убывание происходит более быстро, чем у западных и северо-западных. Так, при южном ветре со скоростью 25 м/с Одесского залива достигают волны высотой до 3,5 м, а Кинбурнского пролива — высотой до 1,5 м (*a* на рис. 2). При юго-восточном ветре данная закономерность выражена сильнее, чем при юго-западном.

В открытой части акватории Черного моря от Одессы до устья Днестра в случаях юго-восточного, южного (*a* на рис. 3) и юго-западного ветров волны распространяются преимущественно по ветру. Однако у западного и восточного побережий имеет место отклонение направления их распространения в сторону меньших глубин на запад и восток соответственно. Поэтому хотя Одесский залив наиболее открыт для волн, приходящих с юго-востока, однако волноопасным оказывается и южный ветер. Причем интенсивность волнения в этих случаях практически одинакова.

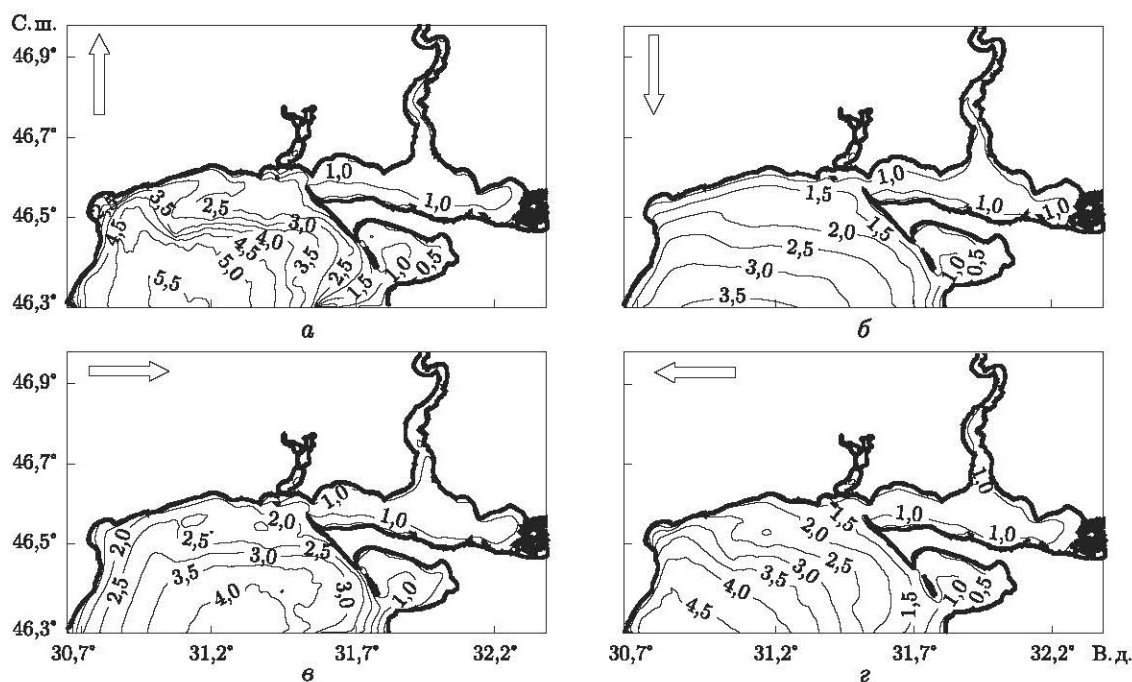


Рис. 2. Высоты волн, м при южном (а), северном (б), западном (в) и восточном (г) ветрах со скоростью 25 м/с

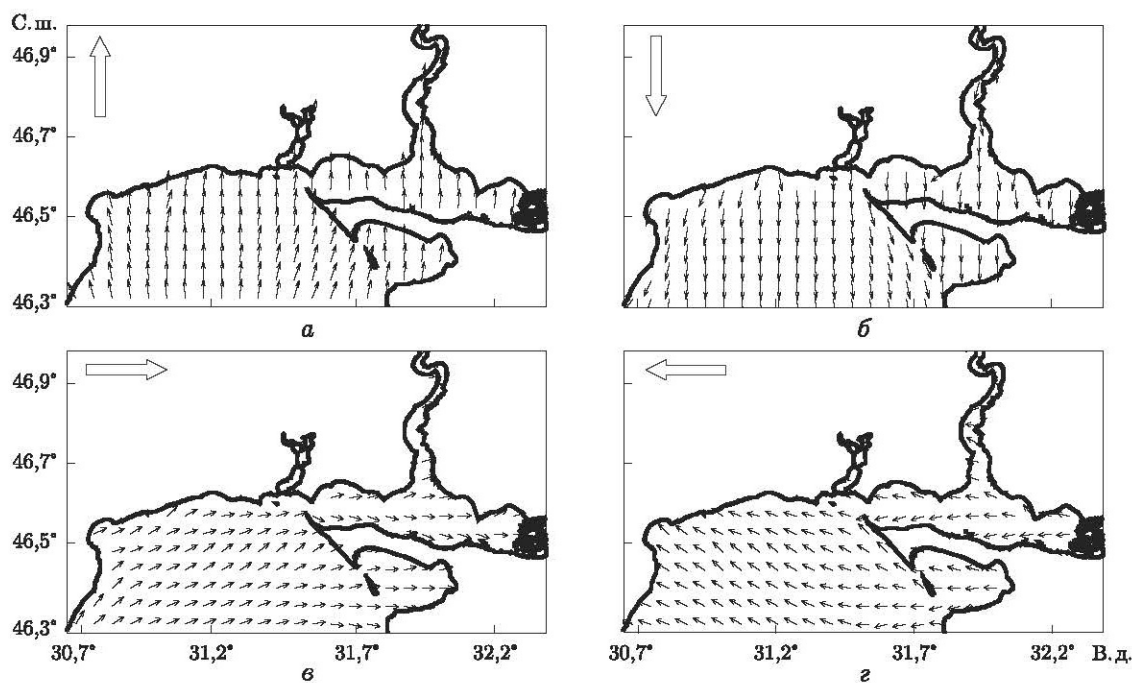


Рис. 3. Направления распространения волн при южном (а), северном (б), западном (в) и восточном (г) ветрах со скоростью 25 м/с

Пространственное распределение величин периодов волн качественно соответствует распределению их высот. Так, при южном и юго-восточном ветрах со скоростью 10 м/с мак-

симальные значения периодов, равные 4 с, имеют место у южной открытой границы рассматриваемой акватории. С ростом силы ветра область с такими значениями смещается к северо-востоку в район Кинбурнского пролива, а на южной границе при скорости ветра в 25 м/с периоды достигают уже 7 с.

При северо-восточном, северном и северо-западном ветрах разгон волн определяется только протяженностью прибрежной зоны в меридиональном направлении. Это приводит к существенно меньшей интенсивности волнения, чем в случае ветров южных направлений. Действительно, при северо-восточном ветре со скоростью 10 м/с высоты волн увеличиваются от 0,4 м у Кинбурнского пролива до 1,2 м у южной границы акватории, а при ветре со скоростью 25 м/с — от 1 до 4 м соответственно. Для северного и северо-западного направлений значения высот волн оказываются незначительно меньше, а пространственное их распределение качественно иным. Так, при северо-восточном ветре увеличение высот волн происходит с северо-востока на юго-запад, а при северном (см. б на рис. 2) и северо-западном направлениях ветра изолинии высот волн ориентированы практически зонально и данное увеличение происходит с севера на юг. Отклонение направлений волн от направлений ветра, имеющее место у западного и восточного побережий, способствует их проникновению из открытой части акватории в Одесский залив (см. б на рис. 3). Но, в силу малости разгонов, это не приводит к существенной интенсификации волнения и высоты волн в заливе не превышают 1,5–2,0 м при скорости ветра 25 м/с.

При изменении скорости ветра от 10 до 25 м/с максимальные значения периодов волн, достигаемые у южной границы рассматриваемой акватории, возрастают от 3,0–3,4 до 5,0–5,4 с. Пространственное их распределение близко к зональному.

Характер волнения при западном и восточном ветрах отличается от рассмотренных выше случаев (см. в, г на рис. 2). Это обусловлено отклонением направлений распространения волн к северу по всей акватории прибрежной зоны Черного моря от Одессы до устья Днепра (см. в, г на рис. 3), вследствие чего сюда проникает волнение с юго-востока при восточном ветре и с юго-запада — при западном. Величины разгона при этом оказываются больше протяженности рассматриваемой акватории с запада на восток, высоты и периоды волн принимают промежуточные значения по сравнению со случаями южных и северных ветров. Так, при скорости ветра 25 м/с максимальные значения высот волн при западном и восточном ветрах составляют 4,0 и 4,5 м соответственно, а максимальные периоды равны 5,6 и 6,2 с.

Пространственное распределение параметров волн в Днепро-Бугском лимане существенно иное, чем в открытой части исследуемой акватории. Это обусловлено его относительной изолированностью, вследствие чего в него могут проникать только волны, распространяющиеся в восточном направлении. В остальных случаях волны генерируются непосредственно в акватории лимана. Величина разгона определяется протяженностью лимана вдоль направления ветра, оказываясь максимальной для восточных и западных ветров и минимальной — для южных и северных.

Поля высот волн при ветрах всех направлений со скоростью 10 м/с характеризуются наличием области локальных максимумов (0,6 м) вблизи южной части Бугского лимана. Положение этой области смещается в соответствии с направлением ветра, также изменяются ее пространственные размеры. Например, при южном ветре размер области минимален и она располагается непосредственно в южной части Бугского лимана, при восточном ветре площадь данной области максимальна и она смещена к западу. У берегов высоты волн уменьшаются. Причем области с малыми значениями высот волн (менее

0,4 м) значительно шире у наветренных берегов, чем у подветренных. В северной части Бугского лимана высоты волн не превышают 0,4 м. Направления распространения волн в основном совпадают с направлениями ветра, и только при западном и восточном ветрах у южного и северного берегов они отклоняются к югу и северу соответственно. Усиление ветра до 15 и 20 м/с приводит к расширению области с наибольшими высотами волн, которые составляют 0,8 и 1,0–1,1 м соответственно. Только при северном и южном ветрах размеры этой области остаются относительно малыми. Когда скорость ветра достигает 25 м/с, область с высотами волн более 1 м распространяется практически на всю ширину Днепровского лимана (см. *a–г* на рис. 2). Максимальные значения при этом достигают 1,3 м. В Бугском лимане интенсивность волнения превышает 1 м, но при западном, северном и северо-западном ветрах такое волнение локализовано в южной части лимана.

Диапазон изменения периодов волн в Днепро-Бугском лимане составляет 1,2–2,2 с при ветре 10 м/с. Область с максимальными их значениями имеет место южнее Бугского лимана, и ее положение несколько меняется в зависимости от направления ветра. Усиление ветра до 15, 20 и 25 м/с приводит к росту максимальных значений периодов до 2,4, 2,8 и 3 с соответственно.

Таким образом, рассмотрено ветровое волнение в прибрежной зоне Черного моря от Одессы до устья Днепра при различных скоростях и направлениях ветра. Установлено, что в открытой части акватории наиболее интенсивное волнение возникает от южного, юго-восточного и юго-западного ветров, а наименее интенсивное — от северного, северо-восточного и северо-западного. Направления распространения волн отклоняются от направлений восточного и западного ветров к северу по всей рассматриваемой акватории. При остальных направлениях ветра волны отклоняются к востоку и западу у восточного и западного берегов соответственно. В Днепро-Бугском лимане максимальные значения высот волн при ветрах разных направлений практически одинаковы. Меняются лишь положение и размеры области их локализации.

1. *Географическая энциклопедия Украины*: В 3 т. – Киев: Украин. сов. энциклопедия, 1989–1993. – Т. 1. – 1989. – 416 с.; Т. 2. – 1990. – 480 с.
2. *Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря* / Сост. В. В. Ефимов, О. И. Комаровская. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – 60 с.
3. *Миньковская Р. Я.* Волнение в Днепровско-Бугском лимане // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*: Сб. науч. тр. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1999. – С. 72–78.
4. <http://www.swan.tudelft.nl>.
5. *Komen G. J., Hasselmann S., Hasselmann K.* On the existence of a fully developed wind-sea spectrum // *J. Phys. Oceanography*. – 1984. – **14**. – P. 1271–1285.
6. *Hasselmann S., Hasselmann K., Allender J. H., Barnett T. P.* Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear transfer for application in wave models // *Ibid.* – 1985. – **15**. – P. 1378–1391.
7. *Полонский А. Б., Фомин В. В., Гармашов А. В.* Характеристики ветрового волнения Черного моря // *Доп. НАН України*. – 2011. – № 8. – С. 108–112.

Д. В. Алексеев

### Дослідження характеристик вітрового хвилювання в прибережній зоні Чорного моря від Одеси до гирла Дніпра при різних вітрових умовах

*З використанням спектральної чисельної моделі SWAN досліджено вітрове хвилювання в прибережній зоні Чорного моря від Одеси до гирла Дніпра. Високе просторове розділення досягнуто за рахунок застосування технології вкладених сіток. Проаналізовано параметри хвиль, що генеруються вітрами восьми основних румбів різної сили. Встановлено, що у відкритій частині акваторії найінтенсивніше хвилювання виникає при південно-східному, південному й південно-західному вітрах, а найменш інтенсивне — при північно-східному, північному й північно-західному. Напрямок хвиль істотно відхиляється від напрямку вітру тільки при західному й східному вітрах. У Дніпро-Бузьському лимані максимальні висоти хвиль при вітрах різних напрямів і однакої сили досить близькі, змінюється лише район їх просторової локалізації.*

D. V. Alekseev

### Investigation of wind wave parameters in the Black Sea coastal zone from Odessa to the Dniper estuary under various wind conditions

*Wind waves in the Black Sea coastal zone from Odessa to the Dniper estuary are studied by using the SWAN spectral numerical model. A high space resolution is achieved due to the implementation of the nested grid technique. Parameters of waves which are generated by winds of eight basic directions and various strengths are analyzed. It is obtained that the most intensive waves in the open part of the water area are caused by south-east, south, and south-west winds, and the least intensive waves are caused by north-east, north, and north-west ones. Wave direction deflects significantly from the wind one only in cases of west and east winds. In the Dniper-Bug estuary, the maximal wave heights in cases of winds with different directions and the same strengths are close enough; only the region of their space location is changed.*