

# КЛИМАТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ РЕАНАЛИЗА ВЕТРО-ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ

*O.I.Komarovskaya*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: efimov@alpha.mhi.iuf.net

*Описывается методика обработки сорокалетнего массива данных реанализа NCEP/NCAR с целью определения климатических ветровых характеристик и численного расчета климатических волновых полей для Черного моря.*

При планировании работ в море, выборе оптимальных трасс мореплавания, оценке условий для гидротехнического строительства необходимо использование справочной информации о характере гидрометеорологических условий и, в особенности, ветра и ветрового волнения в рассматриваемом регионе моря.

Потребность в оценке режима ветра и волнения в океанах и морях определила издание специальных справочников: в 1962г. под названием «Справочные данные по режиму ветров и волнения на морях, омывающих берега СССР»; в 1965г. под названием «Справочные данные по режиму ветров и волнения в океанах». В 1974г. был издан справочник «Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные», а в 1987г. Севастопольским отделением Государственного океанографического института подготовлено и издано справочное пособие «Типовые поля ветра и волнения Черного моря».

В настоящее время появились условия для более точных климатических оценок параметров ветрового волнения. Современные численные модели расчета ветровых поверхностных волн третьего поколения позволяют учитывать все основные физические механизмы, определяющие эволюцию поля поверхностных волн. С другой стороны, появились более полные и более длительные по времени поля приводного ветра, определяющего эволюцию поля поверхностных волн в море. Это обеспечило необходимые условия для работы по созданию атласа ветрового волнения в Черном море. Данная статья описывает первый расчетный этап, который заключается в формировании базы ветро-волновых данных в штормовые периоды за сорок лет для последующей статистической обработки и вычисления статистических оценок ветро-волновых характеристик Черного моря.

## Ветровые данные реанализа NCEP/NCAR

В качестве исходных использованы ветровые данные NCEP/NCAR за сорок лет (1958-1998гг.), представляющие собой массивы компонент вектора скорости ветра с разрешением 1.875° по долготе и гауссовой сеткой по широте с шагом 1.904° [1]. Выделенный район Черного моря включает 40 узлов: 4 градации по широте (40.952°ш - 46.666°ш) и 10 градаций по долготе (26.25°вд - 43.125°вд). Данные имеют временной интервал 6 часов.

Сравнение ветровых данных реанализа с имеющимися данными натурных измерений проиллюстрировано на рис.1. Измерения выполнены в Каркинитском заливе на платформе (координаты 45.71°с.ш., 31.88°в.д.). Для сравнения были взяты данные ближайшего к Каркинитской платформе узла (координаты 44.761°с.ш., 31.875°в.д.). Несмотря на некоторую удаленность выбранного узла от местоположения платформы (приблизительно 100км), а также на то обстоятельство, что измерения ветра производились на высоте 37м, а данные реанализа представляют собой ветер на высоте 10м, в целом можно отметить достаточно хорошее соответствие между ними (коэффициент корреляции 0.75).

## Расчеты ветрового волнения

Из полных по времени массивов ветровых данных реанализа были отобраны штормовые ситуации, определяемые как периоды времени, в которых скорость ветера непосредственно в узлах над морем превышала 10м/с. При невысокой скорости ветра (около 10 м/с) учитывалась и продолжительность его действия при сохранении направления: отбирались периоды длительного (более суток) действия и отбрасывались короткие (менее суток). Для штормовых условий определялись также с заблаговременностью 12ч. поля ветра, предшествующие выбранному периоду времени, а также учитывалось поле в последующие 6ч., что обусловлено инерционностью поля волн. Полученные поля ветра были подготовлены к вводу в численную модель в качестве входных ветровых данных. Для этого поля были проинтерполированы по пространству на сетку модели, а также по времени (временной шаг ввода в модель ветровых данных составляет 3ч) и сформированы в виде отдельных файлов для каждого штормового периода.

Для расчета ветрового волнения использована региональная численная модель ветрового волнения, созданная на базе модели третьего поколения WAM [2].

В соответствии с современными представлениями процесс эволюции ветровых поверхностных волн описывается уравнением

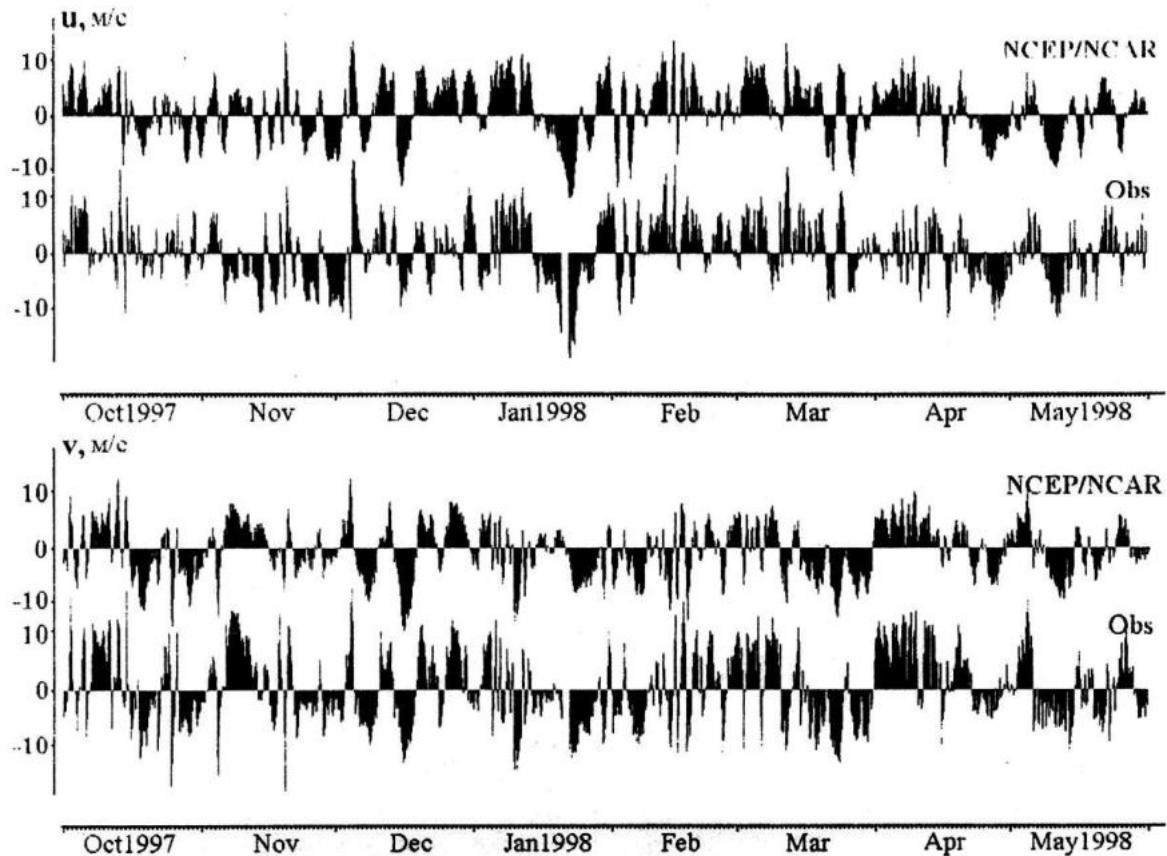


Рис.1. Сравнение компонент вектора скорости ветра данных реанализа и измерений на Каркинитской платформе в период с октября 1997г. по май 1998г.

баланса волновой энергии, записанного для волнового спектра. Функционирование WAM модели основано на решении эволюционного уравнения переноса двумерного спектра ветровых волн:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\phi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\lambda F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\theta F) = S,$$

где  $F(f, \theta, \varphi, \lambda, t)$  – волновой спектр;  $f$  – частота волн;  $\theta$  – направление;  $\varphi$  – широта;  $\lambda$  – длина;  $S = S(f, \theta, \varphi, \lambda, t)$  – функция источника.

Функция источника представляется в виде суммы трёх слагаемых:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{dis},$$

где  $S_{in}$  – генерация волн ветром;  $S_{nl}$  – нелинейное четырехволновое взаимодействие;  $S_{dis}$  – диссипация.

Функция генерации определяется скоростью трения  $U_*$  и в линейном приближении задается формулой [3]:

$$S_{in} = \beta F,$$

$$\text{где } \beta = \max \{ 0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} (28 \frac{U_*}{c} \cos \theta - 1) \} \omega;$$

$\omega = 2\pi f$ ;  $\rho_a, \rho_w$  – плотности воздуха и воды.

Нелинейное четырехволновое взаимодействие  $S_{nl}$  представлено предложенной Хассельманом и др. [4,5] дискретной параметризацией оператора взаимодействий.

Эта параметризация сохраняет основную форму выражения для нелинейного переноса:  $S_{nl}(k_4) = \int \omega_4 \sigma \delta(k_1 + k_2 - k_3 - k_4) \times \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4) \times [n_1 n_2 (n_3 + n_4) - n_3 n_4 (n_1 + n_2)] dk_1 dk_2 dk_3$ ,

где  $n_j = F(k_j)/\omega_j$ , спектр волнового действия, а коэффициент  $\sigma(k_1, k_2, k_3, k_4)$  описывает силу связи резонансного взаимодействия четвёрки волновых векторов  $(k_1, k_2, k_3, k_4)$ .

Функция диссипации определяется формулой, предложенной Коменом и др. [3]:

$$S_{dis} = -3.33 \cdot 10^{-5} \bar{\omega} (\omega / \bar{\omega})^2 (\bar{\alpha} / \bar{\alpha}_{PM})^2 F,$$

где  $\bar{\omega} = E^1 \iint F(f, \theta) \omega df d\theta$  – средняя частота,  $E = \iint F(f, \theta) df d\theta$  – полная энергия волн,  $\bar{\alpha} = E \bar{\omega}^4 g^{-2}$  – интегральный параметр крутизны волн;  $\bar{\alpha}_{PM} = 4.57 \cdot 10^{-3}$  – теоретическое значение  $\bar{\alpha}$  для спектров Пирсона-Московица полностью развитого волнения.

В режиме расчета на мелкой воде в функции источника добавляются поправки, учитывающие потери энергии волн на трение о дно.

Интегрирование функции источника производится по неявной схеме с центральными разностями по времени.

В модели применены две альтернативные схемы распространения: схема распространения по потоку первого порядка

$$F_j^{n+1} = F_j^n - \sum_k \frac{\Delta t}{\Delta x_k \cos \theta} [(u \cos \varphi F'')_k - (u \cos \varphi F'')_{k-1}]$$

и схема "чехарда" второго порядка

$$F_j^{n+1} = F_j^{n-1} - \sum_k \left[ \frac{\Delta t}{2 \Delta x_k \cos \varphi} \times \right.$$

$$\left. \times [(u \cos \varphi F'')_{k+1} - (u \cos \varphi F'')_{k-1}] \right] + diffusion.$$

В приведенных выше уравнениях индекс  $n$  обозначает номер шага по времени, а индексы  $k_-$  и  $k_+$  - соседние по координатной сетке точки относительно точки  $j$  в прямом и обратном направлениях распространения соответственно. Индекс  $k$  пробегает три направления распространения  $\lambda, \varphi$  и  $\theta$ , а  $u_k$  и  $\Delta x_k$  обозначают компоненту скорости в координатах  $(\lambda, \varphi, \theta)$  и шаг сетки соответственно в данных направлениях.

Более подробно описание принципов функционирования самой региональной модели содержится в работе [6].

Модель адаптирована для региона Черного моря, ограниченного координатами  $41^\circ$  с.ш. -  $46.5^\circ$  с.ш. и  $28^\circ$  в.д. -  $41.5^\circ$  в.д. Расчеты выполняются в узлах сетки с шагом  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (23 узла по широте и 55 узлов по долготе). Введены топографические данные рельефа дна и береговой черты.

Модель рассчитывает спектр волн для 25 различных значений набора частот, изменяющихся в логарифмическом масштабе с интервалом  $\Delta f/f = const$ , в частотном диапазоне  $f_{max}/f_{min} \approx 10$ ,  $f_{min} \approx 0.041$  гц и для значений углов, заданных с шагом  $30^\circ$ , т.е. определяющих соответственно 12 направлений распространения. Функция источника интегрируется с временным шагом 10 мин.

#### Результаты расчетов

Расчеты производились в режиме мелкой воды (на мелководье учитывается глубина) без учета рефракции. В качестве начального задается поле волн, определяемое полем начального ветра.

Все расчеты проведены в пакетном режиме на персональном компьютере, процессор типа Pentium с тактовой частотой 200Мгц, оперативная память 64 Мв.

Информационная структура выходных данных, как и подготовленных входных, отображает хронологию штормовых периодов: все шторма классифицированы и упорядочены по годам, месяцам и датам начала.

Выходные данные включают в себя интегральные и спектральные характеристики ветрового волнения. Все параметры выведены

в виде пространственных полей с временным шагом 0.5 ч. каждый в отдельный двоичный файл.

Интегральные характеристики включают следующие параметры ветрового волнения:

- значительная высота волны;
- направление волны;
- скорость ветра (на высоте 10м);
- направление ветра;
- скорость трения;
- средний период;
- период спектрального пика;
- коэффициент сопротивления;
- нормированное волновое напряжение;
- высота волн зыби;
- направление волн зыби;
- среднее направление распространения волн;
- средний период волн зыби.

Все интегральные характеристики сформированы в двоичные файлы двух типов. Для всего региона Черного моря данные выбирались на сетке  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  (12 узлов по широте и 28 узлов по долготе). Полученные пространственные поля для каждой характеристики составляют двоичный файл первого типа. Файлы второго типа содержат такие же поля для северо-западной части Черного моря ( $44.5^\circ - 46.5^\circ$  с.ш;  $29.0^\circ - 33.5^\circ$  в.д) с разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (9 узлов по широте и 19 узлов по долготе). Таким образом, для каждого шторма выведено 26 двоичных файлов интегральных параметров ветрового волнения.

Спектральные характеристики включают в себя:

- спектры волн;
- спектры зыби.

Спектральные характеристики в каждой расчетной точке представляют собой массив значений спектральной плотности на 25 частотах и в 12 направлениях распространения. Спектры выведены в 81 точке, которые выбраны по всему региону Черного моря с разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$  и в северо-западной части - с разрешением  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Каждая спектральная характеристика выведена в отдельный двоичный файл. Для каждого шторма выведено 2 двоичных файла спектральных параметров.

В качестве примера на рис.2 показаны рассчитанное поле высот волн для одного из штормовых периодов и частотно-угловой спектр на тот же момент времени для точки с координатами  $43.25^\circ$  с.ш.,  $34.00^\circ$  в.д.

#### Заключение

В процессе расчета было обработано 1327 штормов и получено около 160тыс. полей выходных характеристик, что соответствует общему непрерывному периода более 3.5тыс. дней. При этом в год в среднем на штормовые

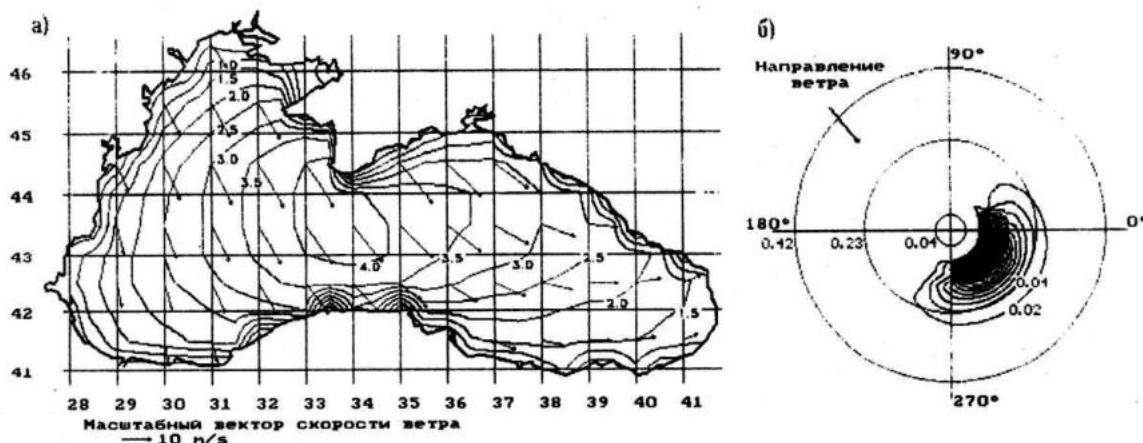


Рис.2. а). Поля ветра и высот волн, рассчитанные на момент времени 19.00 3 ноября 1981г.; б). частотно-угловой спектр волн в точке с координатами 43.25°с.ш., 34.00°в.д. на тот же момент времени.

периоды приходится примерно 85 суток, составляющих в среднем 33 шторма средней продолжительностью 2.5 – 3 суток.

В заархивированном виде все выходные данные расчетов занимают 6 дисков CDROM объемом 650Мб каждый.

В настоящее время производится систематизация и анализ полученных расчетных данных с целью вычисления параметров распределений ветро-волновых характеристик и получения климатических ветро-волновых полей (высот волн заданной повторяемости, периодов волн заданной повторяемости и т.д.) для составления Атласа ветра и волн Черного моря.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. E.Kalnay and Coauthors.1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project.// Bull. Amer. Meteor. Soc.,77,437-471.
2. The WAMDI Group. The WAM Model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model.// Journal of Physical Oceanography, Vol.18, No.12. December 1998, p.1775-1810.
3. Komen G.J. Activities of the WAM (Wave Modelling) Group. Advances in Underwater Technology.// Ocean Science and Offshore Engineering, 1985, Vol.6 Oceanology, p.121-127.
4. Hasselmann S., Hasselmann K. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral.// J. Phys. Oceanogr., 1985, 13 , p.1369-1377.
5. Hasselmann S., Hasselmann K. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models.// J. Phys. Oceanogr., 1985, 15, p.1378-1391.
6. В.В. Ефимов, О.И. Комаровская, М.В. Шокуров. Численная модель ветрового волнения в Черном море.// Препринт. НАН Украины, Морской гидрофизический институт. Севастополь, 1998.