

Физика на морето

Основные принципы создания нового Ветро-волнового атласа Болгарского сектора Черного моря

Здравко К. Белберов, Израиль Н. Давидан***

Добриня Р. Костичкова, Игорь В. Лавренов***

*Леонид И. Лопатухин**, Живелина Ив. Чернева**

*Институт Океанологии БАН (Варна)

**ГОИН (Санкт Петербург)

Отличительной особенностью нового атласа ветров и волнения Болгарского сектора Черного моря является то, что наряду с данными по открытому морю он будет содержать подробные данные по режиму ветров и волнения в прибрежной зоне. До сих пор, содержащиеся в таких атласах сведения о ветровом волнении ограничивались так называемыми районами "глубокой воды", в которых глубина не оказывает влияния на генерацию и распространение волн. Это связано с тем, что отсутствие продолжительных рядов измерений волн и значительная пространственная неоднородность их распределения, существенно затрудняют определение статистических характеристик волн в прибрежных районах океанов и морей. Задача осложняется еще и тем, что заранее трудно установить для каких прибрежных районов понадобятся особенно надежные данные по ветровому волнению. Поэтому, новый атлас будет содержать наряду со статистикой ветра и волн в заранее разграниченных районах, исходные данные, алгоритмы и программы позволяющие

оперативно рассчитать необходимые статистические сведения для любой точки акватории.

Расчет статистических данных о многолетних распределениях ветра и волн на глубокой воде производится путем сочетания результатов обобщения попутных судовых наблюдений с результатами расчета ветра и волнения по барическим полям, приводимым на штормовых синоптических картах. Такой путь уже длительное время используется при составлении атласов и справочников в Государственного океанографического института в Санкт Петербурге (Д а в и д а н, Л о п а т у х и н, Р о ж к о в, 1985). Он заключается в следующем: по данным попутных судовых наблюдений, собранных по морям за длительный период времени, рассчитываются двухмерные и трехмерные функции распределения элементов волн и ветра. Путем переоцифровки шкал, основывающихся на регрессионных соотношениях, полученных сравнением синхронных инструментальных и визуальных определенных волн, осуществляется переход к вол-

нам фиксированной вероятности на промежутке квазистационарности волнового процесса. После этого производится статистическое сглаживание полученных результатов на функциональных сетках асимптотических распределений, обоснование выбора которых опубликовано нами в ряде работ (Давидан, Лопатухин, Рожков, 1985; Сб. под ред. Давидана, 1988). Для модуля скорости ветра принимается склейка распределений Вейбулла и Фреше, для смешанного волнения — нормально-логарифмическое распределение, для ветровых волн и волн зыби — распределение Вейбулла (рис.1). Пример построения карт волнения для Черного моря, полученных указанным

выше путем, приведен на рис.2. В настоящее время массив попутных судовых наблюдений по Черному морю пополнен новыми данными и производится уточнение ранее полученных результатов.

То, что обобщение большого числа недостаточно точных визуальных определенных элементов волн после статистического их выравнивания на основе теоретических асимптотических распределений и при переходе к волнам фиксированной вероятности дает удовлетворительные результаты, видно на следующих примерах. В 1974 году в справочнике под ред. Давидана, Лопатухина, Рожкова (1974) были приведены статистические характеристики ветра и волнения по всем океанам и морям, в том числе по отдельным районам, в которых в последующем проводились инструментальные измерения волн. На рис.3 сопоставлены между собой данные, приведенные в работе, с результатами обобщения инструментальных измерений для двух районов, один из которых расположен в Восточно-Китайском море, другой — в тропической зоне Тихого океана. Из рисунка видно, что полученные ранее для этих районов данные о распределении высот волн путем обобщения попутных судовых наблюдений, хорошо согласуются с обобщением данных инструментальных измерений волн.

Однако, при обобщении попутных судовых наблюдений всегда остаются опасения относительно достоверности распределения ветра и волн очень малой вероятности. Поэтому полученные таким путем функции распределения уточняются по данным расчета ветра и волн по штормовым барическим полям. Вначале по определенным критериям из многолетнего исторического массива срочных синоптических карт выбираются случаи штормов, во время которых могли появиться в расчетной точке ветер и волны определенной величины. Для этих синоптических ситуаций восстанавливаются барические поля. Если имеется достаточное количество точек, в которых известно давление, а изобары над морем не носят замкнутого характер, то давление в узлах расчетной сетки определяется по программе сплайн-интерполяции введенных в ЭВМ

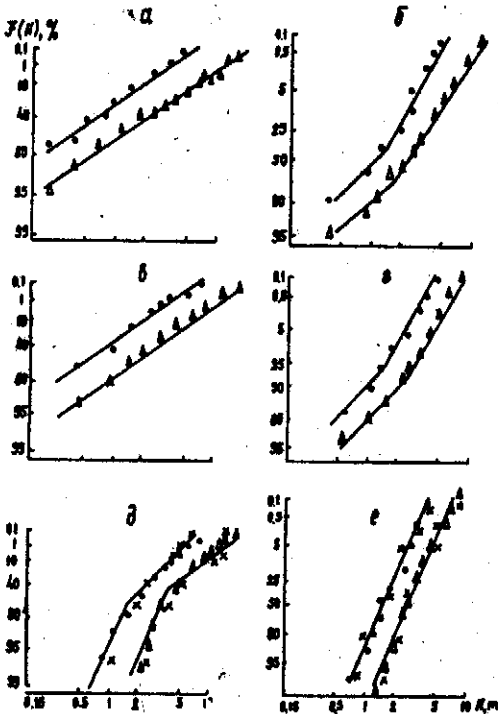


Рис.1. Распределение высот волн на вероятностных сетках

a — распределение Вейбулла (ветровые волны); *b* — лог-нормальное распределение (ветровые волны); *c* — распределение Вейбулла (зыбь); *d* — лог-нормальное распределение (зыбь); *e* — распределение Вейбулла (смешанное волнение); *f* — лог-нормальное распределение (смешанное волнение); 1 — август; 2 — февраль

исходных данных. В противном случае давление снимается путем интерполяции между изобарами, проведенными на синоптической карте. Градиентный ветер рассчитывается по соотношениям геострофического приближения, а приводный ветер — с учетом скорости градиентного ветра и стратификации атмосферы (М а к о в а,

ра и ветрового волнения.

Расчет ветрового волнения по полям давления на глубокой воде проводится по спектрально-параметрической модели (Сб. под ред. Д а в и д а н а, 1988), которая состоит из двух блоков. Один из них включает систему уравнений относительно параметров спектра ветровых волн: ну-

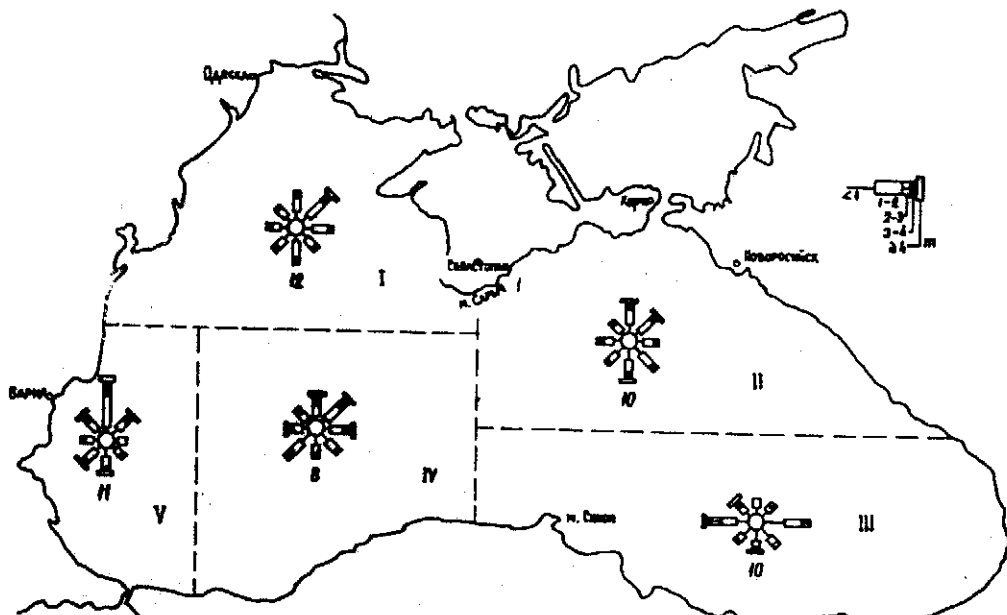


Рис.2. Розы высот волн смешанного волнения

I, ..., V — номера районов; числа под розой — высота волн возможная один раз в 30 лет

1990). Если данных о стратификации нет, то принимается нейтральная стратификация. Появилась также возможность учета стадии развития волнения (Д а в и д а н, 1990).

В настоящее время, для работы над ветро-волновым атласом Черного моря из сороколетнего исторического массива синоптических карт отобрано более тысячи карт, включающих случаи, когда на протяжении хотябы ста километров скорость ветра была 15 м/с и более, а волнение было направлено в сторону Болгарского побережья. Путем более тщательного анализа этих карт будут отобраны случаи, когда по предварительным оценкам средняя высота волн могла быть на глубокой воде вблизи побережья Болгарии 2 м и более. Эти барические поля и послужат в качестве исходных данных для расчета вет-

левого момента спектра m_0 и среднего направления волн θ . За исходную взята аппроксимация частотно-углового спектра $S(\omega, \theta)$ в виде (Д а в и д а н, Л о п а т у х и н, Р о ж к о в, 1985)

$$(1) S(\omega, \theta) = \frac{8}{3\pi} \cos(\theta - \bar{\theta}) m_0 \omega^{-1} \left(\frac{\omega_{\max}}{\omega} \right)^{n-1} \exp\left[(n+1)/n \left(\frac{\omega_{\max}}{\omega} \right)^n \right],$$

где n является функцией безразмерной частоты спектрального максимума $\omega_{\max} = \omega_{\max} U/g$. Используя параметрический аналог уравнения баланса волновой энергии и ранее полученные эмпирические соотношения, связывающие

параметры спектра с ветром, были выведены следующих два параметрических уравнения, численная реализация которых позволяет рассчитать эволюцию спектра ветровых волн:

$$(2) \quad \frac{m_0}{t} + 0,676g\omega_{\max}^{-1}\cos\bar{\theta} \frac{\partial m_0}{\partial x} +$$

$$+ 0,676g\omega_{\max}^{-1}\sin\bar{\theta} \frac{\partial m_0}{\partial y} =$$

$$3,38 \cdot 10^{-5} (\omega_{\max} U/g)^{1,51} \omega_{\max} m_0 \cos(\theta_u - \bar{\theta}),$$

$$(3) \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} + 0,447g\omega_{\max}^{-1}\cos\bar{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} +$$

$$+ 0,447g\omega_{\max}^{-1}\sin\bar{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial y} =$$

$$1,21 \cdot 10^{-5} (\omega_{\max} U/g)^{1,51} \omega_{\max} \sin(\theta_u - \bar{\theta}),$$

где θ_u — направление ветра.

Второй блок спектрально-параметрической модели включает дискретно-спектральный метод расчета эволюции зыби, основанный на численном решении уравнения баланса спектральной плотности

$$(4) \quad \frac{\partial S}{\partial t} + C_{gx} \frac{\partial S}{\partial x} + C_{gy} \frac{\partial S}{\partial y} = G,$$

где $S = S(\omega, \theta, x, y, t)$, C_{gx} и C_{gy} — компоненты групповой скорости; G — функция источника, которая обычно на глубокой воде включает три основных компонента: G_{in} — поступление энергии от ветра к волнам; G_{ds} — диссипацию энергии и G_{nl} — перераспределение энергии внутри спектра волн по причине слабонелинейного взаимодействия между спектральными составляющими. При расчете зыби принимается, что $G = 0$.

По рассчитанным при помощи спектрально-параметрической модели спект-

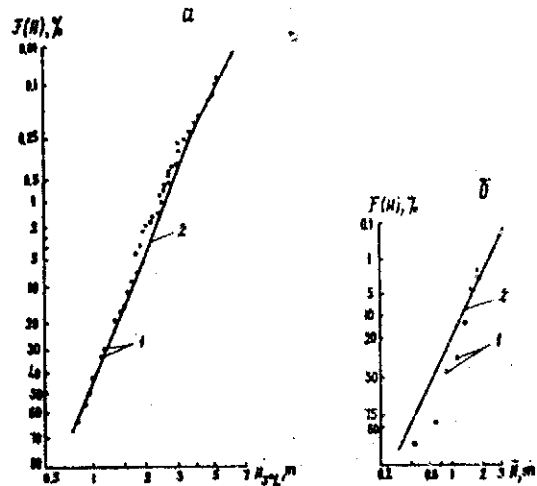


Рис.3. Распределение высот волн по данным Справочника Регистра СССР (1) и измерениям волнения (2)

а — Восточно-Китайское море; б — Тропическая зона Тихого океана

рам ветровых волн и зыби составляет спектр смешанного волнения. При этом, алгоритм взаимодействия этих спектров базируется на принципе сохранения энергии (Сб. под ред. Д а в и д а н а, 1988).

Для верификации спектрально-параметрической модели были использованы специально проведенные в течении пять лет инструментальные измерения волн на Балтийском море в осенне-зимние месяцы, а также данные метеорологических буев, установленных в Северном море. Более подробно результаты верификации изложены в ряде работ (Д а в и д а н и др., 1988). Общее представление о степени согласия расчетных и наблюдаемых данных можно получить из рис.4. Среднеквадратическое отклонение расчетных данных от измеренных составило 0,2 м. При этом, основная причина погрешностей связана с погрешностями в расчете приводного ветра.

Однако были случаи, когда более или менее существенные погрешности были связаны с погрешностями волновой моде-

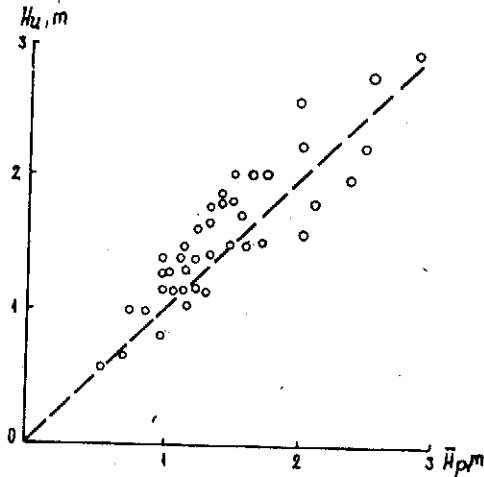


Рис.4. Сопоставление расчетных (H_p) и измеренных (H_0) высот волн в Балтийском и северных морях
Пунктир — $H_p = H_0$

связаны с погрешностями волновой модели. Это обстоятельство (а также то, что сопоставление между собой десяти зарубежных моделей расчета волн — рис.5 — показало очень большие расхождения) заставило снова вернуться к анализу эмпирических соотношений, использованных для определения коэффициентов в спектрально-параметрической модели. Результаты этого анализа (Д а в и д а н, 1990) показали, что причиной расхождений между различными эмпирическими соотношениями, связывающими волны с ветром, является то, что параметры спектра нормируются чаще всего на U_{10} , а при переходе к динамической скорости не учитывается стадия развития волнения. Анализ новых данных измерений на Черном и Балтийском морях и ранее опубликованных в Советском Союзе и за рубежом результатов измерения волнения, позволил получить уточненные соотношения, связывающие параметры спектра с ветром (Д а в и д а н, 1990). Особенность нового обобщения натуральных данных является то, что при их анализе учтена зависимость коэффициента сопротивления C_d не только от скорости ветра, но и от стадии развития волнения и

осуществлен переход от скорости ветра к динамической скорости U_* . Для этого перехода использовано, полученное в работе Д а в и д а н а (1990) соотношение, связывающее параметр шероховатости Z_0 с нулевым моментом спектра и безразмерной частотой спектрального максимума $\omega_{\max} = \omega_{\max} U_* / g$.

$$(5) \quad Z_0 = m_o^{1/2} \pi^{-1} \alpha_{\max}^* \exp(-0,04 \omega_{\max}^{*-1})$$

Нормирование параметров спектра и ветра на U_* (с использованием приведенного выше соотношения), позволило существенно уменьшить тот разброс натуральных данных, который был связан с недостатком физически обоснованным использованием скорости ветра на фиксированной высоте для нормирования параметров спектра и разгона ветра. В результате были получены более универсальные соотношения, связывающие параметры спектра с ветром

$$(6) \quad m_o^* = 4,1 \cdot 10^3 [\text{th}(56 \cdot 10^{-4} x^{*1/2})]^2$$

$$(7) \quad \omega_{\max}^* = 0,5 m_o^{*-0,30} \text{th}(0,52 m_o^{*0,25}),$$

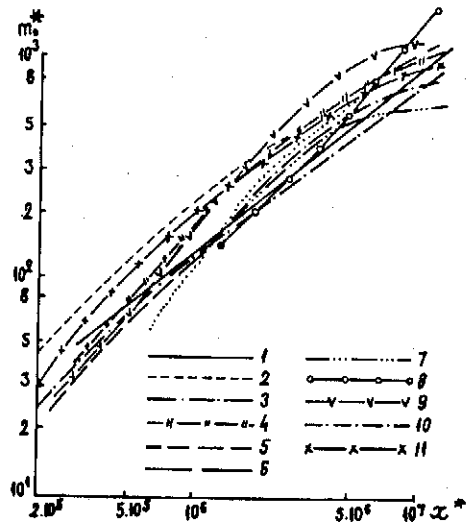


Рис.5. Зависимость m_o^* от x^* по разным моделям 1 — ЛО ГОИИ; 2 — ВМО; 3 — DNS; 4 — ЕХАКТ NL; 5 — GONO; 6 — ИУРА; 7 — MRI; 8 — NOWAMO; 9 — SAIL; 10 — ТОНОКУ; 11 — VENICE

где $m_* = mg^2 U_*^4$, $x = xgU_*^2$, x — разгон ветра. Соотношения (6) и (7) описывают непрерывный переход к стадии полностью развитого волнения в отличие от ранее принятых степенных закономерностей, применимость которых приходилось условно ограничивать, чтобы исключить безграничное развитие волнения. Новые соотношения положены в основу уточненной спектрально-параметрической модели расчета ветрового волнения. Расчет волн по описанной выше модели выполняется для Черного моря в сеточной области с шагом $0,5^\circ$ по широте и 1° по долготе (всего 92 узла). С целью уменьшения трудоемкости расчета волн, используется интерполяционно-лучевой метод численного решения уравнений, который не уступает конечно-разностному в точности и, в то же время, имеет перед ним выигрыш в экономичности, так как в нем может быть использован шаг по времени, больший нежели тот, который определяется условием устойчивости характером для конечно-разностных схем. Это обеспечивается тем, что в интерполяционно-лучевом методе используемые пространственные узлы и временной шаг являются взаимосвязанными и процедуры интерполяции и решения уравнений разделены.

Вероятность рассчитанных по спектрально-параметрическому методу элементов штормового ветрового волнения определяется как отношение числа синоптических сроков, в которых волнение было равно или выше заданного к числу всех сроков использованных синоптических карт. Результаты расчетов ветра и волнения по штормовым барическим полям наносятся на упомянутых выше функциональных сетках совместно с результатами, полученными по попутным судовым наблюдениям, спрямляются и таким образом определяются одномерные распределения ветра и элементов волн. Поскольку в этом расчете участвовало конечное число n значений ветра и волн, то наибольшая из полученных величин является выборочной оценкой квантили $X_{1/n}$ крайнего члена X_{\max} исходного ряда.

Аппроксимация статистических оценок двухмерных распределений элементов волн и ветра строится путем разложения их в ряд по ортогональным полиномам,

коэффициенты которых вычисляются по моментам маргинальных и условных распределений (Д а в и д а н, Л о п а т у х и н, Р о ж к о в, 1985).

Переход от статистики волн на глубокой воде к статистике волн на мелководье производится следующим путем: по средним высотам и периодам двухмерных распределений волн, соответствующих заданному направлению распространения рассчитываются по аппроксимациям, приведенным в работе Д а в и д а н, Л о п а т у х и н, Р о ж к о в (1985) частотно-угловые спектры на глубокой воде. Их вероятность соответствует вероятности сочетаний элементов волн, по которым определены параметры этих спектров. Спектры смешанного волнения разделяются на спектры зыби и ветровых волн, используя те же приемы, которые применяются при разделении спектров в спектрально-параметрической модели. Трансформированные на мелководье спектры ветрового волнения определяются путем перенормирования спектров глубокой воды с частоты спектрального максимума на волновое число соответствующее этой частоте с учетом локальной глубины и результатов полученных при аппроксимации спектра ТМА (В о у с et al., 1987). Задача трансформации частотно-углового спектра зыби на мелководье и крупномасштабных течениях до зоны обрушения, решается в приближении геометрической оптики на основе уравнения баланса спектральной плотности волнового действия — сб. под ред. Д а в и д а н (1988)

$$(8) \frac{\partial N}{\partial t} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial \Omega}{\partial k_i} \frac{\partial}{\partial x_i} - \frac{\partial \Omega}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial k_i} \right) N = G,$$

где $N = S(k, r, t)/\omega$ — спектральная плотность волнового действия, $\omega = \omega(k, r, t)$ — собственная частота, соответствующая данному спектральному компоненту k в точке r и в момент времени t ; Ω — частота измеренная в неподвижной системой координат; r — вектор горизонтальных координат. Рассчитывается трансформация волн на мелководье и течениях путем решения (8) методом характеристик, когда распространение волн происходит по лучам, соответствующим различным гармо-

никам. При этом предполагается, что допустимо пренебречь слабонелинейным переносом энергии, исходя из того, что на ограниченных прибрежных акваториях, рефракция волн может преобладать над слабонелинейным взаимодействием. В качестве подтверждения правомерности такого допущения используется то обстоятельство, что линейные модели трансформации волнового спектра удовлетворительно согласуются с данными натурных измерений (Е щ е н к о, 1978; К а н т а р ж и и др., 1982; К р ы л о в, С т р е к а л о в, Ц ы п л у х и н, 1976).

Задача решается в два этапа. На первом решается обратная задача: исходя из расчетной точки находятся лучи и соответствующие им начальные точки. При этом система уравнений решается интегрированием "назад", т.е. при замене t на $-t$ и проверяются условия выхода луча на свободную границу, где задано начальное значение спектральной плотности энергии. Если луч на нее не выходит, то осуществляется переход к следующему лучу. На втором этапе после нахождения энергонесущих точек уравнения интегрируются "вперед" вдоль лучей. В результате находится спектральная плотность энергии в расчетной точке. Подробное описание решения дано в работе Д ы м о в, К о с т и ч к о в а, Л а в р е н о в (в настоящем выпуске).

Для примера был выполнен указанным выше методом расчет трансформации волн на мелководье у Болгарского побережья, в районе Шкорпиловцы, 11-12 октября 1977 года. Эти даты выбраны, потому что в указанный период в районе выполнялись инструментальные измерения волнения (Dynamical Processes in Coastal Regions, 1990). Случай интересен еще и в том отношении, что отсутствовали данные о волнении на глубокой воде и их пришлось восстановить расчетами по барическому полю по описанной выше спектрально-параметрической модели. Таким образом с инструментальными измерениями волн были сопоставлены расчеты волн на мелководье, полученные последовательно по двум моделям, результаты одной из которых служили в качестве исходных данных для другой модели. При расчете трансформации волн ис-

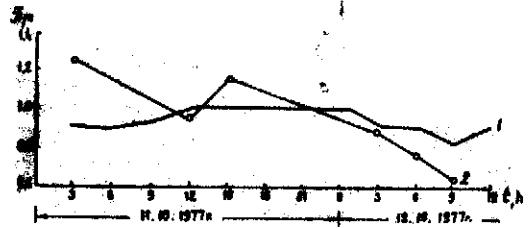


Рис.6. Сопоставление результатов расчета (1) с данными измерений (2) на глубине 10 м

пользован массив глубин в узлах расчетной сетки, полученной по результатам подробных примеров и по специальной программой интерполяции-триангуляции (пакет прикладных программ IMSL). В указанный выше период, метеорологическая ситуация над Черным морем определялась циклоном, распространяющимся в северо-восточном направлении. Сопоставление результатов расчета с данными измерений на глубине 10 м приведено на рис.6. Как видно из рисунка, между расчетными и измеренными на глубине 10 м данными, наблюдается достаточно хорошее соответствие. Средняя высота трансформированных на мелководье волн составила 67% от заданной высотой волн на глубокой воде. Так, как в начале периода в прибрежной зоне отмечалось кроме зыби также и ветровое волнение, которое не было в данном конкретном случае учтено, то и расчетная высота волн в это время оказалась соответственно ниже измеренной.

Определении функции распределения волн в различных точках, где возможно обрушение волн заданной вероятности отличается лишь тем, что в зоне обрушения, расчет волн производится по модели предложенной в работе В а т т j e s, S t i v e (1985) или по методике, изложенной в СНиП — 1983.

В настоящее время разрабатываются общий алгоритм и программа для расчета одномерных и двумерных многолетних распределений ветра и волн на мелководье, включая и зону обрушения, по данным о трехмерных распределениях ветра и волн на глубокой воде.

Создаваемый ветро-волновой атлас будет состоять из двух частей. В первой части будет дано описание всех перечисленных выше методов расчета ветра и волн, включая их обоснование, результаты калибровки и верификации алгоритм и программ. Вторая часть атласа будет включать карты роз ветра и волнения для более крупных районов глубокой воды и более мелких районов и отдельных ха-

рактерных точках прибрежной зоны, а также таблицы одномерных и двумерных функций распределения и плотности вероятностей по месяцам года. По возможности будет создан и компьютерный вариант, позволяющий оперативно решать большое число конкретных задач, связанных с охраной берегов и проектировании гидротехнических сооружений.

Литература

Ветер и волны в океанах и морях, справочные данные. 1974 (под ред. Давидан, И. Н., Л. И. Лопатухин, В. А. Рожков). Л., Транспорт. 359 с. Гут-шабащ, Е. Ш., И. В. Лавренов. 1988. Спектральная модель трансформации ветрового волнения в прибрежной зоне моря с учетом горизонтально-неоднородного течения. — Морской гидрофизический журнал, №5, 15 — 21. Давидан, И. Н., Л. И. Лопатухин, В. А. Рожков. 1985. Ветровое волнение в мировом океане. Л., Гидрометеиздат. 256 с. Давидан, И. Н. и др. 1988. Математическая модель и метод оперативных расчетов ветрового волнения на морях СССР. — Метеорология и гидрология, №11, 81 — 91. Давидан, И. Н. 1990. Закономерности формирования спектральной структуры ветрового волнения. — Тр. НТО „Судостроение“ (в печати). Ещенко, Л. А. 1978. Статистические характеристики волнения в прибрежной зоне с малыми уклонами. — Тр. ГОИН, вып. 139, 29 — 42. Кантаржи, И. Г. и др. 1982. Трансформация волн в прибрежной зоне моря и методика опре-

деления их параметров. — В: Мат. конф. и сов. гидротехнике. Л., Энергоиздат, 24 — 26. Крылов, Ю. М., С. С. Стрекалов, В. Ф. Цыплухин. 1976. Ветровые волны и их воздействие на сооружения. Л., Гидрометеиздат. 256 с. Макарова, В. И. 1989. Методика расчета полей и ветра по полям атмосферного давления. — Тр. ГОИН, вып. 185, 23 — 33. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения. — СНиП 2.06.04-82. М., 1983. Теоретические основы и методы расчета ветрового волнения. 1988 (Сб. под ред. Давидан, И. Н.). Л., Гидрометеиздат. 263 с. B a t t j e s, J. A., M. J. F. S t i v e. 1985. Calibration and Verification of a Dissipation Model for Random Breaking Waves. — J. Phys. Oceanogr., 90, No C5, 9159-9167. B o u w s, E. et al. 1987. Similarity of the Wind Wave Spectrum in Finite Depth Water. Part 2. Statistical Relation Between Shape and Growth Stage Parameters. — Deutsche Hydrogr. Zs., 1, 1-24. Dynamical Processes in Coastal Regions. 1990. Sofia, Bulgarian Academy of Sciences. 190 p.

Main principles for the creation of a new wind-wave atlas of the Bulgarian sector of the Black Sea

Zdravko K. Belberov, Izrail N. Davidan, Dobrina R. Kostichkova, Igor V. Lavrenov, Leonid I. Lopatoukhin, Zhivelina Iv. Cherneva

(Summary)

The main features of the new atlas of the wind and the waves in the Bulgarian sector of the Black Sea have been described. Its main characteristic is that, together with the open sea data it will contain also detailed data about the wind and the waves in the coastal zone. The atlas will consist in two parts. The first part will include a description of all methods that have been used for the calculation of the wind and the wave fields including the results of the calibration and the verification of the algorithms and the

programs. The second part will include wind and wave maps and roses for the deep water and for separate typical points of the coastal zone, as well as tables of the one- and the two-dimensional distribution functions of the wave heights and periods throughout the various months of the year. In case there will be a possibility, a computer version of the atlas will be created which will allow to currently solve various tasks connected with the coastal protection and with the design of hydraulic facilities.

Поступила 2.04.1992 г.