

杭州湾北岸潮滩波浪特征与统计分布*

陈卫跃

(华东师范大学河口海岸研究所, 上海)

收稿日期 1989年9月27日

关键词 波浪, 潮滩

提要 本文分析了杭州湾北岸张家厍潮滩450个测波记录, 讨论了潮滩带波浪特征、波能衰减及波浪的统计分布; 发现破碎波波高同水深间的比值 r 比“常规”破波临界值(0.78)小得多, 波能快速衰减; 波高服从瑞利分布, 周期及波高与周期的联合分布同理论分布偏差较大。

近十几年来, 沙质海岸浅水波浪的研究日益深入, 在波浪变形、波能转移、波成水流以及波浪与海滩地貌相互作用方面取得了重大进展。淤泥质海岸作为广为分布的一种海岸类型, 其地貌形态和物质特性与沙质海岸明显不同, 波浪特征也有一定的差异; 然而, 潮滩波浪研究还相当薄弱。Wells等^[8,9]分别于1975年和1977年8—10月在苏里南淤泥质海岸, 继而在路易斯安那西部潮滩进行了水沙及波浪测量, 提出近岸潮滩波浪近似孤立波, 并讨论了波浪与悬沙含量的变化关系; 他对波浪掀沙作用的理解十分深刻, 但对潮滩波浪作用的调查是初步的, 分析成果也仅限于潮滩波浪的一般特征方面。

笔者在杭州湾北岸张家厍建立了潮滩野外综合观测站。其中波浪观测从1985年10月中旬至1986年6月初, 每天观测4次左右, 持续约8个月, 测波水深在0—4.5m之间。观测站潮滩宽约1400m, 平均坡度2.7‰, 表层沉积物以粉砂为主, 低潮滩平均粒径0.049mm, 中潮滩0.03mm, 高潮滩约0.024mm。从观测资料中选出了450个波浪记录进行处理, 分析了波浪在潮滩带变浅过程中波要素的变化以及波浪的统

计分布。

I. 研究方法

波浪观测采用中国科学院海洋研究所制造的CBS垂线测波仪, 在海塘外560m和1300m的中、低潮滩分别设置两个高约9m和4.5m的测波架(图1), 并将两个长8m和4m的垂线测波探头固定在测波架上, 用屏蔽电线将探头与岸上观测室的录音机左右通道和测波仪相连, 每次测量10min。测波架上标有25cm间隔的

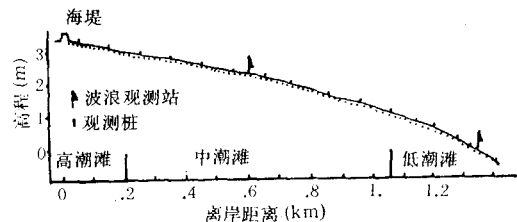


图1 张家厍潮滩剖面及波浪观察点位置

Fig. 1 The mudflat profile and the location of wave observation at Zhangjiashe

* 本文是在导师陈吉余教授热情指导下完成的; 陈宏达同志曾协助进行野外观测; 劳治声、金庆祥副教授提供了许多宝贵意见。谨致谢意。

刻度,在波浪观测的同时,用望远镜观测测波架水深及破波宽度;另外,可观测通过内测架的波浪总数和破碎波数量计算破碎波所占的比例。数据采样利用青岛海洋大学波浪室的数字采集仪和 IBM-PC 微机完成的。采样间隔 0.125s, 采样数为 4 096 个,部分记录采样 2 048 个。在大波易破碎的假定下,通过目测破波比例和波浪记录可确定最小破碎波波高及相应的水深,从而计算参数 r 值。

II. 波浪特征

II.1. 波谱特征

观测站位于杭州湾北岸,波浪大多来自东南方向,涌浪相对较少。观测期间,4m 水深处均方根波高从 0.10m 到 1.25m 不等,平均波高为 0.627m。谱峰周期约 3.5s,谱宽度参数较大 ($V = \left(\frac{3}{2}\right)^{1/2} IQR C \tau, \tau = T/\bar{T}$),属浅水宽谱波浪(表 1)。波浪传入潮滩带后,波谷展宽,在水边线附近的浅水区域可见到类似孤立波的波浪形态(图 2)。

用参数 ϵ ($\epsilon = a_b w^2 / g \tan^2 \beta, a_b$ ——破波振

表 1 张家库潮滩波浪参数

Tab. 1 Wave parameters on the flat at Zhangjiashe

| Run | 日期 (年、月、日) | 水深 (m) | 均方根 波高 (m) | 谱峰周期 (s) | 波谱宽度 |
|-------|---------------|-----------|------------------|-------------|-------|
| L0078 | 1985.11.4 | 4.232 | 0.894 | 3.10 | 0.661 |
| R0078 | | 1.742 | 0.348 | 3.50 | 0.615 |
| L0082 | 1985.11.5 | 3.847 | 0.577 | 3.20 | 0.607 |
| R0082 | | 1.764 | 0.349 | 3.40 | 0.600 |
| L0132 | 1985.11.20 | 2.897 | 0.361 | 2.10 | 0.711 |
| R0132 | | 0.495 | 0.120 | 2.30 | 0.788 |
| L0144 | 1985.11.24 | 2.814 | 0.344 | 3.00 | |
| R0144 | | 0.394 | 0.068 | 4.50 | 0.738 |
| L0178 | 1985.12.5 | 2.851 | 0.346 | 5.00 | |
| R0178 | | 0.389 | 0.083 | 10.1 | 0.766 |
| L0181 | 1985.12.6 | 3.182 | 0.531 | 5.10 | |
| R0181 | | 0.792 | 0.203 | 8.00 | |
| L0184 | 1985.12.6 | 3.891 | 0.618 | 6.25 | |
| R0184 | | 1.315 | 0.247 | 12.56 | 0.650 |

注: L 为低潮滩测波点数据; R 为中潮滩测波点数据。

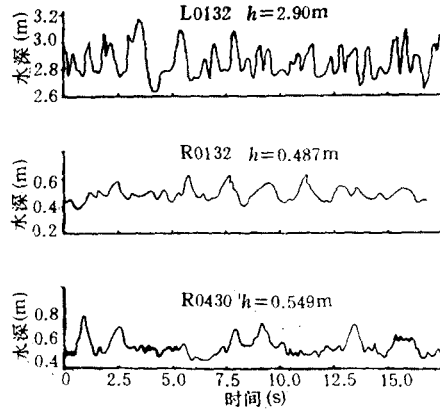


图 2 张家库潮滩典型的波浪记录

Fig. 2 Typical wave records at the Zhangjiashe

幅, ω ——入射波圆频率, g ——重力加速度, β ——海滩坡度)区别两种不同的海滩^[10]: $\epsilon > 20$ 属消散性海滩,破波以崩坡为特征,并形成长周期 ($T > 50s$) 重力边缘波 (Infragravity edge Wave); $\epsilon < 2.5$ 属反射性海滩,破波以卷波为特征,并出现分谐波边缘波 (Subharmonic edge Wave)。

观测站潮滩激岸浪带宽约 50—100m,暴风雨时可达 1300m 左右;圆频率 ω 从 4—15 每秒弧度不等,振幅大多在 1m 以下,因此, ϵ 值一般大于 10 000,具低能强消散特征。观测结果显示波浪在向岸传播过程中,不论是否破碎,谱峰明显向低频转移(图 3),周期随浅水因子

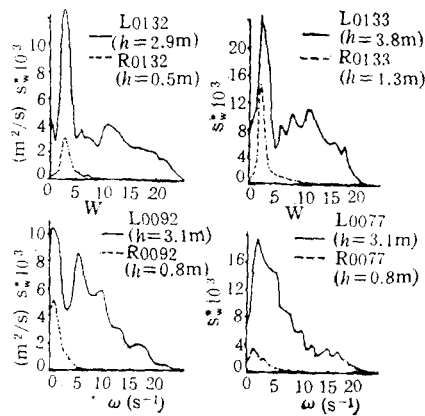


图 3 张家库潮滩典型的波浪能谱

Fig. 3 Typical wave energy spectra at Zhangjiashe

H^* ($H^* = H_{rms}/h$) 增大而变长(图 4), 表明潮滩波浪存在较强的非线性作用; 然而, 没有发现周期大于 10s 的长波。

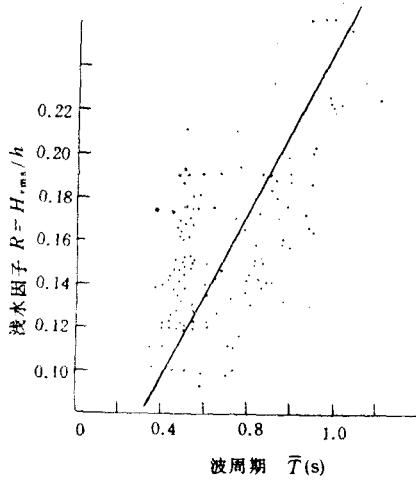


图 4 周期与浅水因子关系

Fig. 4 The relationship between \bar{T} and R

离岸风时, 波谱可出现双峰形态, 低频峰对应的周期一般为 6—8s, 与湾内涌浪周期接近, 双峰形态的出现可能是涌浪和风浪共同作用的结果。

II. 2. 波浪破碎判数 γ

参数 r 对研究波浪破碎及沿岸流和泥沙运动有重要意义。Bowen 等^[3]的实验结果表明崩波条件下 r 值介于 0.88—1.28 之间, Weisher 和 Byrne(1979) 报告的平均 r 值为 0.78, 我国常用 0.78。Wright, Guza 和 Short(1982)^[10] 在澳大利亚南部消散性海滩激岸浪带的调查中得到的平均 r 值为 0.42。表明 r 值在环境不同的海滩有不同的数值, 而在坡度很小的低能强消散潮滩还未见报道。

张家库潮滩 r 值的观测方法: 用 CBS 垂线测波仪测波的同时, 目测通过内测架测杆的未破波和已破波的波浪数量 (测波仪和目测同步进行); 将测波仪所测波高由大到小依次排列; 假定波高较大的波为破碎波, 并用目测已破波的波浪数量以确定破碎波的数量; 将目测已破波浪数量 N_b 对应的第 N_b 个大波波高作为最小破碎波波高 H_b , 将最小破碎波波高 H_b 除以相应的水深即为 r 值。从 1985 年 10 月 28 日到 12 月 7 日共进行 7d 11 次观测, 结果表明 r 值明显小于 0.78 (表 2), 平均值约 0.30 左右。最大值小于 0.78。所得 r 值指已破波同水深之

表 2 张家库潮滩 γ 值统计

Tab. 2 Statistics of γ on the flat at Zhangjiashe

| Run | 水深 $h(m)$ | 目测总波数 N_t^* | 破碎波波数 N_b^* | $e^* = N_b^*/N_t^*$ | 均方根波高 $H_{max}(m)$ | 第 N_b^* 个大波波高 $H_b(m)$ | $r_{max} = \frac{H_{max}}{h}$ | $\gamma = H_b/h$ |
|-------|--------------|------------------|------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------|
| R0040 | 1.75 | 162 | 96 | 0.59 | 0.73 | 0.51 | 0.41 | 0.29 |
| R0044 | 1.21 | 58 | 28 | 0.48 | 0.49 | 0.35 | 0.41 | 0.29 |
| R0046 | 1.66 | 206 | 150 | 0.73 | 1.12 | 0.50 | 0.67 | 0.30 |
| R0078 | 1.74 | 85 | 64 | 0.75 | 0.73 | 0.52 | 0.42 | 0.29 |
| R0082 | 1.76 | 82 | 20 | 0.24 | 0.84 | 0.52 | 0.48 | 0.30 |
| R0132 | 0.50 | 132 | 56 | 0.42 | 0.26 | 0.15 | 0.53 | 0.30 |
| R0144 | 0.39 | 60 | 26 | 0.43 | 0.14 | 0.13 | 0.36 | 0.33 |
| R0178 | 0.39 | 59 | 35 | 0.59 | 0.16 | 0.13 | 0.41 | 0.30 |
| R0181 | 0.79 | 125 | 78 | 0.62 | 0.42 | 0.23 | 0.53 | 0.29 |
| R0183 | 0.65 | 70 | 25 | 0.36 | 0.46 | 0.26 | 0.71 | 0.40 |
| R0184 | 1.32 | 43 | 10 | 0.23 | 0.51 | 0.40 | 0.40 | 0.30 |

N_t^*, N_b^* 为目测总波数和破碎波波数 $e^* = N_b^*/N_t^*$; H_{max} 为波高最大值 (m); H_b 为由目测破碎波波数确定的第 N_b^* 个大波的波高 (m); $r_{max} = H_{max}/h$, $\gamma = H_b/h$ 。

比,同波浪濒临破碎的 r 值可能有所差别。

II. 3. 波能衰减

波浪从外测点传到内测点,传播距离仅 740 m,能量损失却大于 80% (图 5,波能以 $E = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2$ 公式计算)。

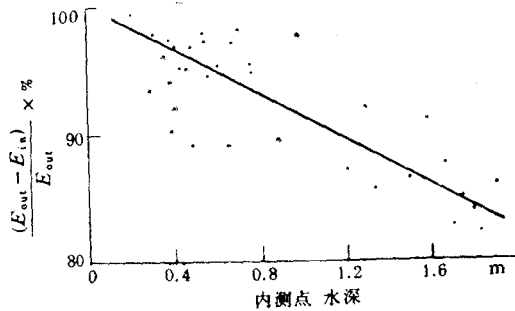


图 5 张家厍潮滩波能损耗

Fig. 5 Energy loss at Zhangjiashe

E_{out} 为低潮滩波能; E_{in} 为中潮滩波能

潮滩波能衰减机理与沙质海岸有所不同。最近研究表明波浪作用下淤泥质底床的周期性振动是导致潮滩波能衰减的一个重要因素^[8,11,12,13]。Suhayda 等^[13](1977)认为底床淤泥运动造成的波能衰减至少比渗透或底摩擦引起的波能衰减高一个数量级。在假定波浪垂直坡度均一海岸条件下,根据 Battjes 和 Janssen (1978)的波能平衡方程,取摩擦系数 f 为 0.01,计算发现观测站潮滩由底摩擦引起的波能衰减量不到波能衰减总量的 5%。因此,波浪破碎和波浪作用下淤泥质底床的振动是波能衰减的主要原因。

观测站潮滩,内测波点水深变化在 0—2.0 m 之间,外测波点水深变化在 0—4.5m 之间。浅水因子介于 0.05—0.30,谱宽度介于 0.37—0.95,波高与周期的相关系数介于 0.15—0.85,平均值为 0.42。

III. 波浪的统计分布

III. 1. 波高分布

Longuet-Higgins^[7] (1975) 在窄谱条件下

提出波高服从瑞利分布:

$$F(H) = \exp \left[-\left(\frac{H}{H_{rms}} \right)^2 \right]$$

密度函数为:

$$f(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} \exp \left[-\left(\frac{H}{H_{rms}} \right)^2 \right]$$

虽然观测站潮滩波浪大多属宽谱形态,且在向岸传播过程中周期变长,能量向低频转移,但低、中潮滩不同水深所测的大部分波浪记录的波高分布与理论分布相当吻合(图 6)。

III. 2. 周期分布

潮滩带波浪高频成分较多,周期与理论分布偏差较大(图 7);为了得到周期的经验分布,设周期服从威布尔分布族,即:

$$E(x) = \exp[-x^\alpha/\beta]$$

$$x = T/\bar{T}$$

并设

$$y = \ln[\ln E(x)/\ln R(x)]$$

$$= \ln(8/\beta) + (\alpha - 2)\ln x$$

式中 $E(x)$ 为实测分布, $R(x)$ 为瑞利分布;如若周期服从瑞利分布,则在 y 和 $\ln x$ 为纵横坐标轴的图中,可得到一条 $y = 0$ 并同横轴平行的直线;如若此直线与横轴不平行,则可求出 α, β 值。

图 8 显示潮滩波浪周期服从 $\alpha = 1.30, \beta = 1$ 的指数分布:

$$E(x) = \exp \left[-\left(\frac{T}{\bar{T}} \right)^{1.30} \right]$$

III. 3. 波高与周期的联合分布

Longuet-Higgins^[7](1975)提出的波高与周期的理论分布为:

$$f(\zeta, \tau) = \frac{2}{\nu \sqrt{\pi}} \zeta^2 \exp \left\{ -\zeta^2 \left[1 + \frac{(\tau - 1)^2}{\nu^2} \right] \right\}$$

其中 $\zeta = H/H_{rms}$, $\tau = T/\bar{T}$,

$$\nu = \left(\frac{3}{2} \right)^{1/2} \text{IQR}(\tau)$$

上述分布有两个显著的特点: 概率密度值

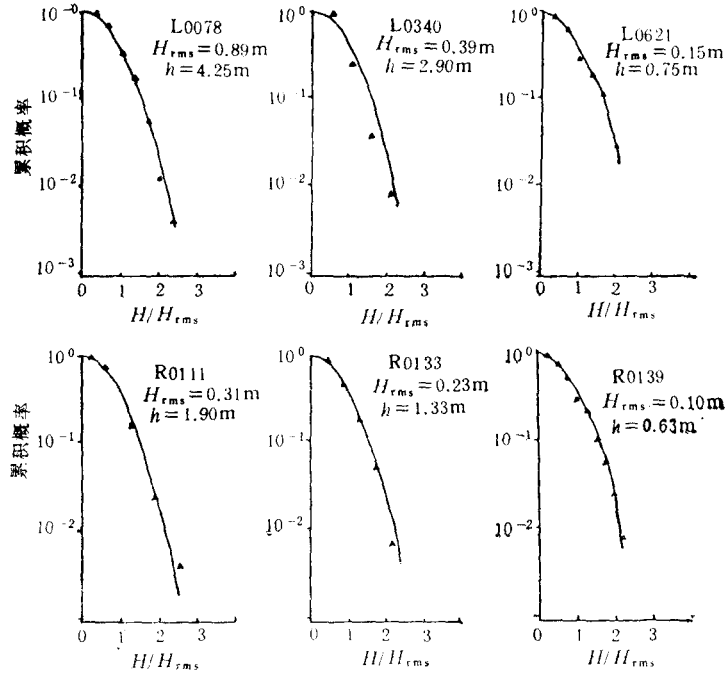


图6 波高累积概率

(实线为瑞利分布,三角点为实测资料)

Fig. 6 Cumulation probability of a given normalized wave height (The triangles are data measured the solid line is the Rayleigh distribution)

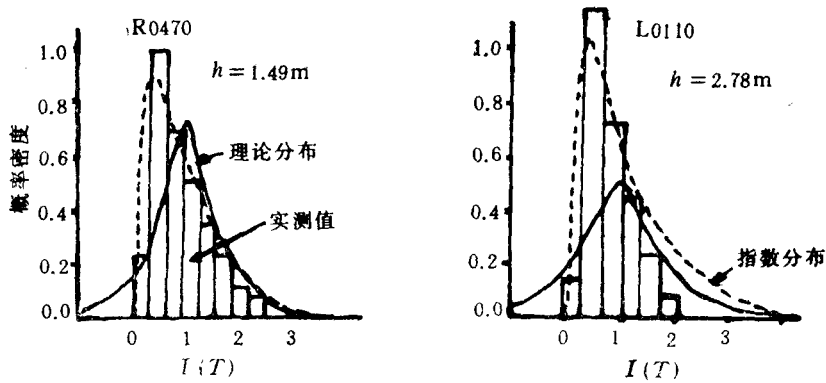


图7 实测周期分布与理论分布比较

Fig. 7 Observed wave period distrution versus Longuet-Higgins distribution

对称于直线 $\tau = 1$; 每个波高区间的周期累积概率相同。

图9显示观测站波高与周期联合分布的概率密度值不对称于 $\tau = 1$; 这种差异在周期与波高相关系数较大的测次更为明显。在各个波

高区内,周期的25%,50%,75%分位点对应的周期累计值也不相同(表3);因此,波高与周期的联合分布同理论分布不相符合,这可能同波高与周期相关性较强和不符合窄谱条件有关。

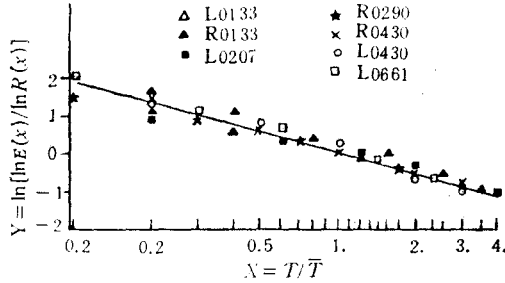


图 8 周期分布与瑞利分布的偏差

Fig. 8 Deviation of the observed period in the Rayleigh distribution

$E(x)$ 为实测周期分布; $R(x)$ 为瑞利分布

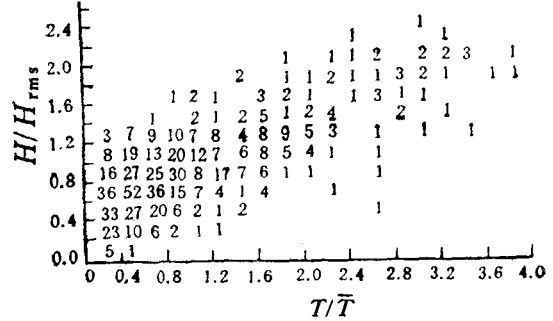


图 9 波高与周期联合分布概率密度

Fig. 9 Scatter diagram relating height and period of waves

(R 0 133 $H_{rms}=0.21m$, $T=0.66s$, $h=1.32m$, $N=750$)

表 3 波周期分布分位点 (R0133)

Tab. 3 Quartiles of wave period distribution

| H/H_{rms} 范围 | 波浪数 | T/T_{mean} 的分位点 | | | 分位点变化范围 |
|----------------|-----|-------------------|-------|-------|---------|
| | | 第一分位点 | 第二分位点 | 第三分位点 | |
| 0.0—0.2 | 6 | ..... | ..... | ..... | ..... |
| 0.2—0.4 | 43 | ..... | 0.36 | 0.60 | ..... |
| 0.4—0.6 | 115 | ..... | 0.42 | 0.66 | ..... |
| 0.6—0.8 | 155 | 0.41 | 0.55 | 0.72 | 0.31 |
| 0.8—1.0 | 144 | 0.54 | 0.81 | 1.16 | 0.62 |
| 1.0—1.2 | 104 | 0.60 | 0.92 | 1.40 | 0.80 |
| 1.2—1.4 | 76 | 0.80 | 1.26 | 1.80 | 1.00 |
| 1.4—1.6 | 21 | 1.50 | 1.90 | 2.30 | 0.80 |
| 1.6—1.8 | 16 | 1.40 | 1.92 | 2.52 | 1.12 |
| 1.8—2.0 | 15 | 2.16 | 2.68 | 3.08 | 0.92 |
| 2.0—2.2 | 13 | 2.66 | 3.20 | 3.46 | 0.80 |
| 2.2—2.4 | 2 | ..... | ..... | ..... | ..... |
| 2.4—2.6 | 1 | ..... | ..... | ..... | ..... |
| total | 711 | | | | |

IV. 结论

IV. 1. 潮滩波浪以浅水宽谱为特征; 波浪 在变形过程中谱峰向低频区转移, 周期随浅水 因子 $H^*(H^* = H_{rms}/h)$ 增大而变长, 但没有发现 长周期重力边缘波。

IV. 2. 破碎波波高与水深之比 r 约 0.30 左右, 明显小于通常接受的 r 值 (0.78)。进一 步的调查是十分必要的。

IV. 3. 波浪传入潮滩带后快速衰减; 波浪

作用下淤泥质潮滩粘-塑性滩面的周期性运动 可能是导致波能快速消耗的主要因素之一。

IV. 4. 浅水宽谱的潮滩波浪, 其波高也服 从理论分布; 而周期分布以及波高与周期的联 合分布同理论分布差异较大。

参考文献

[1] 吕常五、徐来声、于学仁、王仁颐, 1982。江苏沿海波浪 要素分布函数的确定。海岸工程 1: 59—64。
[2] 常德毓, 1987。胶州湾特征波要素间的统计关系。海 岸工程 6(2): 65—71。

CHARACTERISTICS AND STATISTICAL DISTRIBUTIONS OF WAVES ON A MUDDY FLAT, NORTHERN COAST OF HANGZHOU BAY

Chen Weiyue

(Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai)

Received: Sep. 27, 1989

Key Words: Waves, Tidal flat

Abstract

The 450 wave records on tidal flats at Zhangjiashe, northern coast of Hangzhou Bay, are analysed in this paper. The wave characteristics, transformation of wave energy and statistical distribution of waves are discussed.

The critical values of wave breaking, $r(r = H_b/h_b)$, are much smaller than the "conventional" values. The wave energy decays rapidly. The wave height correlates well with the Rayleigh distribution. The distribution of wave periods and the joint distribution of wave heights and periods, deviates, however, from the theoretical distribution.