

科學譯叢

——海洋、水文學：第 1 種——

海 浪 預 報

H. A. 勃林斯基等著

中國科學院出版

本書內容提要

這本蘇聯海浪預報論文選共收集了四篇論文，第一篇是 Л. Ф. 季托夫所著的“波級與海況的新等級”，他概括地引述了常用的四種等級表，並且指出這些表中把海況與波級混淆一起是錯誤的，着重地分析了海況與波級是兩個完全不同的概念，最後根據他在海浪觀測的實踐中的豐富經驗，列舉風浪，涌浪及海況等級表，使觀測與預報有了精確的標準。第二、三兩篇分別是 H. A. 勃林斯基，K. И. 庫特掠娃姬所著的海浪預報，內容大致相同，但都有其特色。兩文都以深入淺出的文筆，介紹了海浪基本概念，海浪的生成，發展與傳播及一些經驗的與理論的公式，而對海浪預報的實際操作過程更有詳細明確的說明，並舉出實例以資參考。前一篇在風能與波浪能量的傳遞及淺水區域中風與波浪關係的建立等方面敘述較詳，而後一篇在風浪發展過程中與氣象因子的關係這方面作了清楚的解釋。所以這兩篇論文對於廣大範圍的海浪工作者，是具有重大的實際意義的。第四篇是 B. B. 斯托克曼在俄譯英美海浪預報文獻一書中的序文，他有系統地介紹了英美在最近十年來在海浪預報的理論研究與實際應用方面的一般情況，並批判地肯定了英美海浪工作者的成就，同時也着重地指出蘇聯科學家在海浪研究工作中的貢獻。他還介紹了近來所用的幾種預報法及觀測法，所以從此可以獲得海浪預報工作發展過程的輪廓概念。更從斯托克曼所指出的英美海浪工作者的缺點中，我們從事海浪研究工作的人，也可以吸取經驗教訓，看出今後努力的方向。

目 錄

序	趙九章	1
波級與海況的新等級	Л. Ф. 季托夫	4
海浪預報	Н. А. 勃林斯基	12
1. 波浪的一些普通知識——前言		12
2. 波浪的發展		17
3. 波能的傳遞		20
4. 風能及波能		26
5. 波陡與波齡的關係		31
6. 風力作用時間及風區		32
7. 波浪要素的計算		36
8. 狹小區域上波浪預報關係的建立		45
9. 波浪預報圖的編製		51
10. 波浪預報的實施		56
海退預報	К. И. 庫特掠娃姪	57
1. 普通知識		57
2. 波浪的發展		60
3. 氣流的各個要素對於海浪生長及傳播的影響		63
4. 波浪尺度與風的關係		69
5. 波浪預報		89
附錄 1. 本章參考文獻		93
2. 本章增補參考文獻		94
3. 本章所用符號		94
“海退預報原理”的序文	В. Б. 斯托克曼	96
譯名對照表		108

序

海面波浪是最早爲人類所注意的自然現象，沿海漁民在生產鬥爭的實踐中，已積累了不少的經驗，可以從海面情況來估計未來海上風暴的徵兆。但是由於海浪是海面上極其複雜的自然現象，精確的觀測比較困難，因此過去物理學家與數學家對於海浪的研究，大都是從理想流體力學入手，祇憑藉理論的演證，很少從觀測入手，使理論不能與實踐相結合，所以在應用方面就不可能有很多的貢獻，結果把海浪研究漸漸地變成爲純粹的數學問題了。這種情況一直到最近十多年內，才有了改變。由於研究結合了實際的需要，從解決國防及經濟建設所提出來的海浪問題中，海浪科學特別是在海浪預告方面有了重大的進展。

從歷史的記載上，海浪的破壞性對於人類歷史與國家前途曾經起了極重大的影響。在上古史中，波斯王 Xerxes 在侵略希臘的戰爭中，他的艦隊包括三百艘海船和二萬戰鬥人員，在 Mount Athos 風暴中，全軍被海浪所覆滅。此後不久，橫渡 Hellespont 海峽的浮橋又被海浪所摧毀，波斯軍隊不得不被迫退兵，使波斯在那一次戰役中受了嚴重的打擊。最近第二次世界大戰，在諾曼第 (Normandy) 登陸的戰役中，由於英美聯軍不能正確地掌握海浪預報，在運輸兵員和物資的時間和地點的準確性方面大受影響，致原定的作戰計劃在實行中出了許多問題，甚至招致重大的損失！

在平時，海上風暴和颱風是威脅海上交通、水產採集和人民生命財產的自然災害，我們除了利用海上島嶼，船舶的氣象記載或者用飛機出海探測外，還可以利用沿海海浪的觀測和分析，預測風暴的中心和它們移動的路徑。此外海塘工程和海港建設，都必須先掌握各地海浪的衝擊壓力和由海浪而引起的海流冲刷以及泥沙搬運的規律，才能作出完善的設計，不致在建築以後為海浪所破壞。中國是一個擁有一萬里以上的海岸線的國家，為了祖國的國防和經濟建設，海浪的研究是刻不容緩的巨大工作。

蘇聯海洋科學家，在 B. B. 修林金院士，B. M. 馬克維也夫教授，Л. Ф. 季托夫教授，B. Б. 斯托克曼教授等領導下，對於海浪的研究無論在理論方面和實際應用方面，都有了輝煌的成就。在我們從學習蘇聯先進經驗以建立中國的海浪觀測和預告工作中，管秉賢同志選擇了四篇重要著作，列為專集刊印出來，無疑地將對於中國從事於海浪研究和海港工程建設有重大的意義！

這本小冊子共收集了四篇論文，第一篇是 Л. Ф. 季托夫教授所著的：“波級與海況的新等級”。文中引述了現在使用的四種觀測海面情況和波浪尺度的等級表格，以淺近容易了解的敘述，把海浪的基本原理表達出來，從而清楚地把“海況”和“波級”的概念分別出來，並以表格規定了風浪，湧浪和海況的等級。這不但使觀測海面情況和海浪尺度有了明確的標準，也使海浪研究從此建立在更精確的觀測基礎上面。第二篇是 H. A. 勃林斯基所著的“海洋水文氣象情報及預測”一書中的

第五章，第三篇是 К. И. 庫特掠娃姪所著的“海洋水文預報”一書中的第八章，兩篇的標題都是海浪預報。兩文都以深入淺出的文筆將波浪的基本概念，浪的生成、發展、傳播以及經驗的和理論的公式一一敘述，而對於海浪預報實際操作的過程，更有詳細明確的說明，並舉出實際例子作為參證，這無論是對於從事海浪觀測或海浪研究工作者，都是極有用的文獻。末了一篇是 В. Б. 斯托克曼教授在俄譯英美作者關於海浪預報論文集的一篇序文。這一篇論文是關於英美海洋學者最近十年內工作的綜合報導，他一方面批判地肯定了英美工作者的成績，同時也重點介紹了蘇聯科學家的貢獻。在他批判英美科學工作者的缺點中，我們從事海浪研究的科學工作者也可以看出了今後工作的方向。

爲了建立中國的海浪和海洋氣象工作，讓我再一次歡迎這一本譯著的出版。

趙九章 1953年12月25日

波級與海況的新等級

Л. Ф. 季托夫

目前我們所採用的“波浪等級”，彼此互有差異，這在觀測時會引起困難，並使記錄資料不一致。同時，這也是總括觀測結果時發生錯誤的根源，並且又使各種技術計算複雜化。

現有的等級可以分爲四類：

- 1) 第一類等級把波級與波浪要素結合起來；
- 2) 第二類等級包含按照海面情況的外部徵象所測定的波級；
- 3) 第三類等級不但把波級與海況外部徵象連系起來，並且也與風力相結合；
- 4) 第四類等級統一了波級與波浪要素，海況及風力的關係。

應用這些等級的觀測者，要他們來測定些什麼呢？是「波級」，或是「海況」，還是兩者在一起呢？這兩個術語不表示同一個概念嗎？我們以爲「波級」與「海況」決非一事。

如所週知，以級別來表示的波級乃是波動力的指標，而波動力須視波浪尺度而定。因此波級就得依照海面某一時間內所存在的波浪尺度而定。波浪愈大，則波動力也愈大，而波級，即其級別也愈高。

早在十九世紀上半葉就有這樣的解釋：即把波級的概念認

作為觀波浪尺度而定的波動力的表示法，那時在實際觀測中已用級別來測定波浪。

有經驗的海上觀測者，在測定波級時，並不進行各種波浪要素的特殊測定，他能從那些最觸目的波浪的波高中，獲得波動力的概念。其他的現象，尤其是風對海面的作用，在某種程度上是有助於這種測定。

風的作用不僅引起波浪尺度的增加；除掉這些決定某種波動力即級別的主要過程以外，海面也發生其他的變化：例如出現所謂「白浪」，即破碎波峯的意思；並且當風力增強時，波峯頂部發生顛覆，出現浪花，飛沫等等。

這一切現象，不管是描述了海面情況的徵象，而這些現象的強弱，主要是由風力來決定的。

風力在水面上的作用，必定要形成波浪。然而波浪的尺度除風速外，尚視風力作用的時間及風所吹過的海面尺度而定。並且對每一個風級來說，爲了要在風力作用下發展成爲某一級的波浪，必需要有完全確定的風力作用時間及風所吹過的海面尺度。因此，風力作用下的海況外部徵象及決定波級的波浪尺度，這兩者之間的關係，祇有，當具備了充分的風力作用時間及海面尺度，使得風能完全地發展、生成與其風力相稱的波浪時，才能存在。

在大洋上，形成波浪的風的這種作用，經常不受到外部條件的限制；在波級與風級之間，因而也就是在波浪尺度與受風力作用的海面外部徵象之間，勢將存在着多少不變的關係。在海上或在被海岸，島嶼或淺水所包圍的孤立地區，那裏的風向

風力，不像大洋上能經常穩定，類似的關係，便不能長期存在。這種關係可能受到某種程度的破壞。

從這些論述中，可能會引起那種推廣規律的錯誤想法，以為風浪的級別將永遠比風級小一級。7 級風與波級之間的關係，隨其風力作用時間及海面被這風所吹過的尺度而異，大致情形如下：

風時（即風力作用時間，小時）…………… 2、4、6、9。

風區（公里）……………20、60、120、190。

波級（級別）…………… 3、4、5、6。

風級與波級的差別，有時顯然可以達到幾級。

在一般情況外，淺海海岸附近的波高將小於廣海的。因而，雖是同一個波浪，其波級在廣海的却經常高於沿岸的。然而海的外形，在海岸附近反而經常要比廣海的波動得更強烈些。波浪的破裂，波浪巨大的陡度，佈滿了浪花的十分明顯的波峯的形成及飛沫等等，這些都決定着海的外形。因而假如要根據海面情況來決定波級的話，那末近岸的似乎將永遠高於廣海的，這就使得我們大多數的沿岸觀測站，在他們的觀測中經常提高了波級。

我們可以這樣說：風力作用下的「海面情況」是海面上所發生的過程的質的特徵，而「波級」是波浪的量的特徵，因為它與波浪尺度相結合。此外，海面情況反映出海面上與風力作用有關的現象，但並不涉及如湧浪傳播的現象。反之，波級也有屬於湧浪情況的，因而它不以風力為依據而反映波浪尺度。

所以海況與波級的概念是完全不同的，而應分別研究，不

可把它們混爲一談。

根據上述，第一類等級是波浪級別，第二類是有風時海面情況的級別，而第三，第四類包含第一，第二兩類，並予以人爲的統一。自然，這種統一除有害之外，對觀測工作，不能帶來任何的好處。

這些等級（第三，第四兩類）應用在實際觀測時，可能會發生完全不合理的情形，那就是根據風速表的某種測量，可以決定波級，而後再根據波級決定波高。另一方面把風力作用在海面上的徵象，當作決定波級的徵象看待，這樣，就使得即使是在亞速海的觀測者，也會測出 9 級的波級。

把測定有風時的海況與波級這兩件事混在一起的等級，我們認爲應予以駁斥。每一種測定應各自獨立。符合這樣的等級應有三種：一種等級爲有風時的海況，其他兩種等級爲波級（一爲風浪的，一爲湧浪的）。

第一種等級應包含有風時海況的級別，並說明海面外形的徵象。第二，三種等級應包含風浪及湧浪的級別，並包含這些級別與波浪尺度首先是與波高之間的關係。按照第一種等級，在任何海面上測定海況時，可以分別出有九個級別；而按照第二，三種等級測定時，每一海洋有其某種最大可能的風浪與湧浪級別，這種級別視海面上所觀測到的最大波浪尺度而定。觀測者在沿岸測定波級時，也根據波浪尺度。

曾經有過這樣一種看法，他們認爲並不需要把波浪尺度換算成爲波浪等級，直接成爲波素的測定要來得更簡單些。但是我們不應該忘記：波浪要素的測定，特別是在廣海上，在絕大

多數的場合中，只有藉助於目力才能實現，用波級的概括測定，來代替這種不正確的測定是完全適合的。目力測定的不正確性，並不嚴重地影響到波級測定的正確性。與每一個波級相稱的波素，其尺度應有某一個間隔，以便減少目測波素中的錯誤影響。

表 1 給每一級別的風浪列舉了整數間隔的波高值及與其相稱的波長及週期。表 2 是給每一級別的湧浪的，並且此表中波高與波長的平均比率為 1:30。根據觀測者的經驗，波長超過 200 公尺的巨大湧浪是相當少的，因此把湧浪的最大級別定為 VIII（風浪為 IX）。此外風浪轉變為湧浪時，經常伴隨着波動有某種程度的削弱；因而並不需要把湧浪最大級別與風浪最大級別定為一樣。

列舉在表 1 及 2 中的波浪要素即波高，波長及週期間的關係，只有對那些發展及傳播在淺海以外的波浪才屬真實；所謂淺海也就是那些海深不致影響波形及波浪尺度的區域。若海深不致小於表面波的半波長，則淺海影響可以略去不計。按照這種條件，在表 1, 2 中列舉了每一個風浪及湧浪級別的最小深度，到達這個深度時，表中所列舉的波浪要素之間的關係才算成立。同時，這種有關海深的資料，也近似地說明了某一級別的風浪或湧浪將開始轉變為淺海波時的深度。在廣海中，可以認為：凡具有表 1, 2 中所示的波高的波浪，也將具有同一表中所示的波長與週期。淺海就不能這樣了。所以在沿岸地區測定波級時，唯一的標準就是波高。

表 1. 風浪等級表

風浪的級別	風浪的名稱	波 浪 尺 度			波浪要素之間的關係式為風浪時的最小限度
		波高 (公尺)	波長 (公尺)	週期 (秒)	
0	平 靜 (отсутствует)	—	—	—	—
1	微 浪 (слабое)	<0.25	<5.0	<2.0	2
2		0.25—0.75	5—15	2—3.0	3
3	中 浪 (умеренное)	0.75—1.25	15—25	3—4	7
4		1.25—2.0	25—40	4—5	12
5		2.0—3.5	40—75	5—7	20
6	強 浪 (сильное)	3.5—6.0	75—125	7—9	35
7		6.0—8.5	125—170	9—11	60
8		8.5—11.0	170—220	11—12	80
9	巨 浪 (исключительное)	>11.0	>220	>12	—

表 2. 湧浪等級表

湧浪的級別	湧浪的名稱	湧 浪 的 平 均 尺 度			湧浪要素之間的關係式為風浪時的最低限度
		波高 (公尺)	波長 (公尺)	週期 (秒)	
0	平 靜 (отсутствует)	—	—	—	—
1	微 浪 (слабая)	<0.25	<10	<2	5
2		0.50	15	3	7
3	中 浪 (умеренная)	1.0	30	4	15
4		2.0	60	6	30
5		3.0	90	8	45
6	大 浪 крупная	5.0	150	10	75
7		7.0	210	12	110
8		>7.0	>210	>12	—

表 1, 2 中所列舉的關係, 若與頒發給海洋水文氣象站的現有參考書中的與此類似的等級相比, 其差別並不大。

現在我們來討論一下關於海況等級的問題。

處在風力作用下的海洋外形, 其最大的特徵, 就是波峯的形成。我們認為在海況特徵的說明中, 必須着重注意這些徵象: 即波峯的形狀, 海面浪花的出現——這是描述海況最明顯的現象。並不需要指明「海的吼聲或低語」。觀測者也不必把他的注意力集中在波浪的尺度上, 後者是在測定波級時應予以測定的。

表 3 中所列舉的海況等級是根據上述論述構作而成的。

在海況等級 (表 3) 中, 選定 5—6 級作為海況由 [平靜] 變成 [風暴] 的界線, 這正與風由 6 級變成 7 級相當。7 級風已是暴風, 故 6 級或大於 6 級的海況具有 [風暴] 的性質。

選定 2—3 級作為海況由 [平靜] 變成 [不平靜] 的界線, 這正與 1 級風變為 3 級風 (即微風) 相當。

在波級 (表 1) 中 [微] 浪指波高在 0.75 公尺以下的波浪而言, [中] 浪指波高在 35 公尺以下的波浪而言, [強] 浪——11 公尺以下, 具有更大的波高的波浪稱為 [巨] 浪。

湧浪 (表 2) 也規定有同樣的劃分。這種簡化, 無疑地將使海況徵象的說明與波級的應用得到方便。

最後我們來談一些有關實際應用所介紹的各等級表的事情。

波級與海況的測定必須分別進行。第一種測定的標準是波浪尺度而首先是波高。第二種測定的標準是風力作用下的海面的外貌。有湧浪時並不測定海況, 只根據其尺度而定波級。

表 3. 海況等級表

海況的級別	海況的名稱	決定海況的徵象
0	完全平靜 (совершенно спокойное)	海平如鏡
1	平 靜 (спокойное)	波紋
2		波峯不大，開始破裂，但浪花不是白色的，而是玻璃色的。
3	不 平 靜 (неспокойное)	波浪不大，但很觸目，其中有些波峯破裂，形成白色繞旋的浪花——“白浪”。
4		波浪具有十分明顯的形狀，到處形成白浪。
5		出現高大的波峯，泡沫狀的波頂佔有很大的面積，風開始破壞波峯上的浪花。
6	風 暴 (бурное)	波峯現出風暴波的長浪形狀，波峯上風所破壞的浪花，開始沿着波浪斜面伸長成帶狀。
7		風所破壞的浪花長帶佈滿了波浪的斜面，有幾處地方，潛合達到波谷。
8		浪花廣闊而稠密潛合成帶，佈滿了波浪斜面，海面因而變成白色，只有波底有些地方，才沒有浪花。
9	異常的風暴 (исключительно бурное)	整個海面佈滿了稠密的浪花層，空氣中充滿了水點與飛沫，能見度顯著降低。

波級與海況級別的記錄用分數形式表之。分子表波級，分母表海況。為避免錯誤計，最好第一種記錄用羅馬數字書寫，而第二種用阿拉伯數字書寫。

因為風浪級別永遠不可能大於海況級別，故上述分數將永遠為真分數。若這分數的數值愈小，則水面尺度對於這地方波浪發展的影響也愈少，那就是說：這地方愈能免受廣海波浪的侵入。

譯自蘇聯“氣象學與水文學”雜誌 1952 年第 5 期

海 浪 預 報

H. A. 勃 林 斯 基

§ 1. 海浪的一些普通知識——前言

運動在海面上的空氣，激起了複雜的海流系統，同時也發生了海面水位的改變，這種稱之為漲落振動。隨着水位漲落振動的發展就形成了海洋水位的自由振動，其週期為一晝夜及半晝夜。若自由振動的週期接近強制力的週期，譬如在上述海陸風的情形中，則這種不斷被週期地改變着的風所支持的振動，應視作為強制的，而且這種振動隨着強制力作用的存在而存在。在海陸風情形中，這種振動的週期為一晝夜，在季候風則為一年。

但是空氣在水面上的運動，除海流及與其有關的長週期的海面水位振動以外，尚激起了另一種週期小至以秒計的海面水位振動，這就是指風浪而言。此時海面變化非常顯著，波動面是不平衡的，一部份海洋比海洋靜止面或高或低的情形看得很明顯。這種海面的不平衡只能由於水點*的運動而產生，因此波浪應與水點運動有關，如在漲落振動現象中一樣。但在漲落振動時，很容易看到海流，水點的移動及水位的改變。有波浪時也可以看到並且也可以測定海面的水位與靜止面的偏差，但要

*譯者註：水點原應譯為水的質點，文中均以水點簡稱之。

看出水點的移動就很困難。關於這種運動，我們只好憑想像來理解，而不去直接觀測。但是理論或實驗的研究都證明了發生波浪時水點在垂直面內作振動，而且大多數是作圓周運動。水點運動軌道的半徑將隨着運動水點離海面的距離而減小。

波浪通常有這些要素：

波峯——海面水位與平衡水位向上的最大偏差；

波谷——海面水位與平衡水位向下的最大偏差；

波高——海面水位與平衡水位的最大偏差之間的垂直距離，或波谷與波峯之間的垂直距離；

波長——兩個波峯或兩個波谷之間的水平距離；

週期——兩個相鄰波峯或波谷經過一定點所隔的時間；

波速——波峯或波谷在單位時間內在水平方向上所移動的距離；

波陡——波高對波長的比率，表出的數值。

上面所列舉的波浪要素，互相以嚴密的數學公式聯系着，如令：

h — 波高；

a — 波幅；

L — 波長；

T — 週期；

C — 波速；

$\delta = \frac{h}{L}$ — 波陡；

g — 重力加速度；

$\pi = 3.14$ ，

則可寫出下列的簡單關係式：

$$C = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{g}{2\pi}} L = \frac{g}{2\pi} T;$$

$$L = \frac{2\pi}{g} C^2 = \frac{g}{2\pi} T^2;$$

$$T = \sqrt{\frac{2\pi}{g}} L = \frac{2\pi}{g} C.$$

當海深大於半波長時，無論對於單一波浪或對於一系列完全類似的波浪，這些公式都是正確的。當海面上風浪發作時，同時存在着許多波浪。在同一個時間內可以看到巨大的，波高達 10 公尺以上，而波長以數 10 公尺計的波浪；也可以看到微小的，初生的，波高僅以公分計的波浪。一個凝視着海面的觀測者，當他面臨着那些正在很好地發展着的波浪時，無疑的會發生一個問題：到底所指的是那些波高，波長，週期，波陡及波速呢？所以首先大家必須取得一個統一的認識，到底應該觀測那種波浪？應該分析那種波浪，以進一步來預報那些波浪。

如所週知，立體照像是觀測波浪的一種方法，這種方法可以測定某一海洋面積上，在一定時間內的海面波動情況。假定我們擁有每隔 5 分鐘的一些海面照片，並把這些照片加以精細的整理以後，可以製成一表，那麼此表就可用以描述該區域在某一時間內（譬如一小時）的海況特性。我們可以把從每張照片上所測定而得的波高及波長列入表中。

利用關係式， $T = \sqrt{\frac{2\pi}{g}} L$ ，可以將計算求得的波浪週期，填入表內；然後再根據關係式 $C = \frac{L}{T}$ 而求得波速。此外，將