

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ВОЛН

3.1. Результаты измерений параметров поверхностных волн с помощью буя в районе г. Геленджик

Использование морских путей, судостроение, гидротехническое строительство, планирование и производство морских работ, изучение гидродинамических процессов и структуры вод моря требуют знания характеристик волн. Взволнованная поверхность характеризуется волнами, различными по высоте и направлению, периоду и длине, скорости распространения и т. д. Характерной чертой ветрового волнения является высокая степень его изменчивости во времени и пространстве, нерегулярность и разнородность размеров волн при фиксированной силе волнения.

Проблема расчета многолетнего распределения волн в океанах и морях, другими словами, волнового климата, приобретает все большее значение. При изучении волнового климата делается упор на изучение тех статистических характеристик ветрового волнения, которые необходимы для решения практических задач. Получение статистических характеристик волн для конкретного района невозможно без использования новейших физических теорий развития и распространения волн, оценок достоверности общих методов измерений волн и анализа полученных результатов, без применения самых современных методов анализа временных рядов и построения вероятностных моделей многолетней изменчивости волнения. С другой стороны, решение различных практических проектов требует различных статистических характеристик волнения. Для решения одних задач достаточно иметь сведения по статистике отдельно взятых волн, для других – могут потребоваться сведения по статистике групп волн или по статистике спектров. Кроме того, для различных сооружений требуются сведения о вероятности волн, возможных за различный период: от нескольких до тысяч лет.

Сравнение различных данных, полученных без учета и с учетом местных условий, показывает, что построение волнового климата на основе условного районирования акватории вполне допустимо и применимо для задач общего масштаба, например, при проводке судов, но для решения проблем местного уровня (береговое строительство, формирование пляжевых участков) необходимо всестороннее и тщательное изучение конкретных волновых и атмосферных условий.

Краткая характеристика исходных данных. Регулярные наблюдения за морским ветровым волнением на Черном море практически не проводились. Имеющиеся в распоряжении составленные разными авторами атласы волнения, за неимением реальных данных, представляют восстановленные поля волнения по типизированным синоптическим ситуациям соответствующей обеспеченности.

На этом фоне проведенный в 1996-1998 годах и продолженный с апреля 2000 года усилиями Южного отделения ИО РАН эксперимент по наблюдению за морским волнением носит действительно уникальный характер.

В сентябре 1996 года с целью изучения волнового климата Черного моря в открытом море в районе г. Геленджика был установлен волноизмерительный буй “Directional Waverider Buoy”, изготовленный нидерландской фирмой DATAWELL (Kos’yan et al., 1998). Его подробное описание приведено в 1-й главе. Координаты точки установки: 44°30’40 N, 37°58’70 E, глубина места – 85 м, что для всех наблюдавшихся волн соответствует условиям глубокой воды.

За все время проведения эксперимента с июля 1996 г по апрель 1998 г получено отдельно 6106 волнограмм и файлов со спектральными статистиками, составляющие основную базу. В табл. 3.1. приведены данные по всему времени наблюдений. Таблица включает информацию о наибольших зафиксированных высотах и периодах волн и содержит сведения о количестве записей с зарегистрированным превышением высоты волны $H_{1/3}$ уровней в 2, 3, 4 и 5 метров.

Таблица 3.1.

Общая характеристика инструментальных наблюдений за морским волнением

Время работы		Число записей	Продолжительность записей		$(H_{1/3})_{max}$ м	$(T_{1/3})_{max}$ сек	H_{max} м	T_{max} сек	Число записей с $H_{1/3} >$				Число записей с $H_{max} >$			
начало	оконч.		часы	дни					2 м	3 м	4 м	5 м	2 м	3 м	4 м	5 м
10.07.96	31.12.96	1693	564	23.5	5.63	9.8	7.70	10.4	353	96	19	4	529	229	81	29
01.01.97	31.12.97	3399	1133	47.2	6.45	10.1	8.43	10.4	646	188	75	26	1041	439	168	90
01.01.98	07.04.98	1014	338	14.1	5.34	10.5	7.73	11.4	332	114	18	3	463	236	100	28
Всего		6106	2035	84.8	6.45	10.5	8.43	11.4	1331	398	112	33	2033	904	349	147

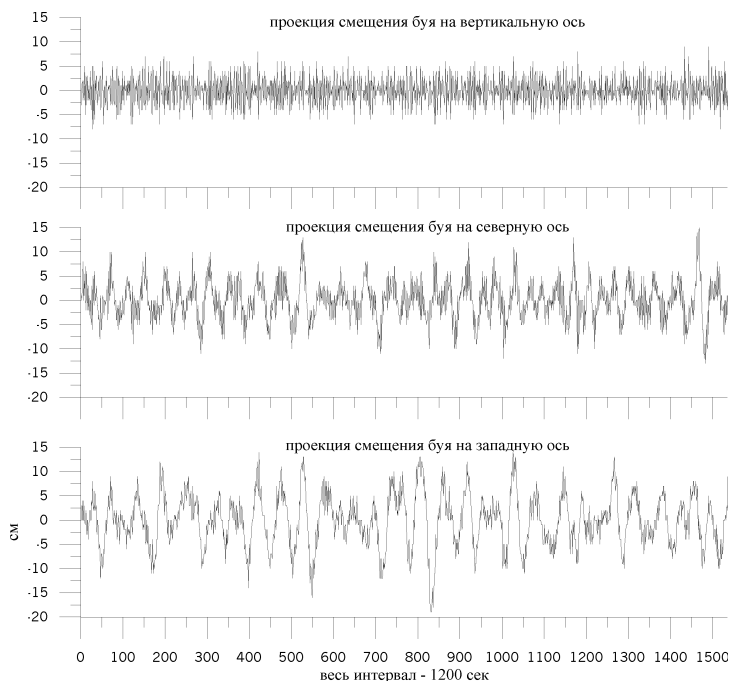


Рис. 3.1. Исходные данные, получаемые с буя

Рисунок 3.1. воспроизводит пример записи с исходными данными, соответствующими вертикальной и двум горизонтальным проекциям смещения буя. Напомним, что длина каждой реализации 20 минут, с дискретностью измерений 0,78125 сек.

В ходе эксперимента удалось накопить почти двухлетний, практически непрерывный, ряд наблюдений за параметрами морского ветрового волнения. Небольшие перерывы эксперимента были

обусловлены рядом важных независимых обстоятельств: необходимость замены элементов питания, разрыв якорной системы, проблемы с электроснабжением. Существенного влияния на статистику исходных данных они не оказали. В апреле 2000 года натурный эксперимент продолжен, база данных продолжает непрерывно пополняться.

Полученный уникальный материал дает возможность исследования статистических и спектральных характеристик волн на промежутках квазистационарности, в рамках синоптической и сезонной изменчивости, анализа закономерностей штормовой активности, построения некоторых климатических обобщений.

Временные масштабы изменения поля ветрового волнения. Ветровое волнение является нестационарным вероятностным процессом ввиду синоптической изменчивости условий волнообразования. Экспериментальные данные показывают, что эволюция поля ветрового волнения происходит в широком диапазоне пространственно-временных масштабов (Лавренов, 1999):

- период колебаний волновых движений или просто период волн. Периоды ветрового волнения изменяются в диапазоне от нескольких секунд до двух десятков секунд. Определяющими факторами являются стадия развития волнения, скорость ветра, системы течений, фон зыби и другие;

- волновые движения, связанные с групповой структурой волнения. Периоды групповых волновых колебаний изменяются в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен секунд (Давидан и др., 1978). Группы волн повторяются примерно через 10-15 средних периодов волн и состоят из 5-9 волн;

- промежутков квазистационарности продолжительностью от десятка минут до нескольких часов (Заславский, Красицкий, 1993; Bitner-Gregersen, Gran, 1983). На таком временном отрезке процесс рассматривается как эргодичный в том смысле, что вероятностным характеристикам отдельных его реализаций придается известная степень общности с вероятностными характеристиками гипотетического (полученного при аналогичных условиях) ансамбля выборочных функций (Драган и др., 1987). В пределах промежутка квазистационарности волнение как физический процесс в статистическом смысле полагается неизменным. Статистическими характеристиками, принятыми для описания волнения в пределах этого промежутка, являются распределения видимых элементов волн и функции спектральной плотности:

- изменчивость в синоптическом диапазоне порядка от нескольких часов до суток;
- сезонная изменчивость, связанная с перестройкой влияющего атмосферного поля в рамках годового цикла;
- межгодовая изменчивость, обусловленная глобальными климатическими тенденциями.

Отличие указанных временных масштабов изменения полей ветрового волнения позволяет исследовать эволюцию полей волнения в одном масштабе независимо от другого. С другой стороны остается открытым вопрос о взаимном влиянии пространственно-временной эволюции волнового поля одного масштаба на другой.

Маргинальные распределения. Маргинальные распределения высот волн на промежутке квазистационарности принадлежат к классу распределений Вейбулла вида (Лопатухин, 1974; Давидан и др., 1978, 1985; Boukhanovsky et al., 1998, 1999):

$$F(x) = \exp\left(-A\left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^k\right), \quad (3.1)$$

где k – параметр формы, $A = \Gamma^k(1+1/k)$ – гамма-функция.

На рис. 3.2 приведены распределения высот волн на сетке распределения Вейбулла с параметром формы $k=2,1$. Полученные законы близки к распределению Рэля, который является частным случаем закона Вейбулла при $k=2$ и находит широкое применение в гидрометеорологической практике.

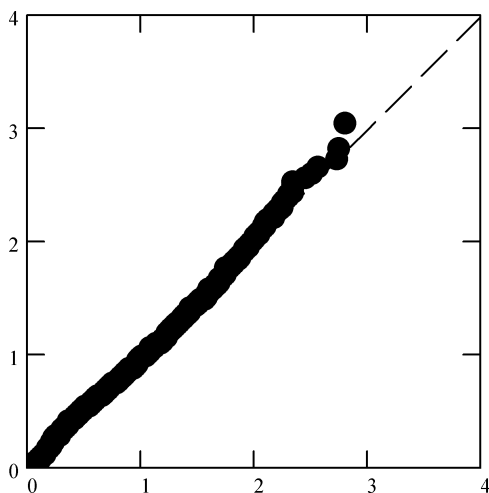


Рис. 3.2. Распределение высот волн на промежутке квазистационарности: по оси X – квантили экспериментального распределения, по оси Y – квантили распределения Вейбулла

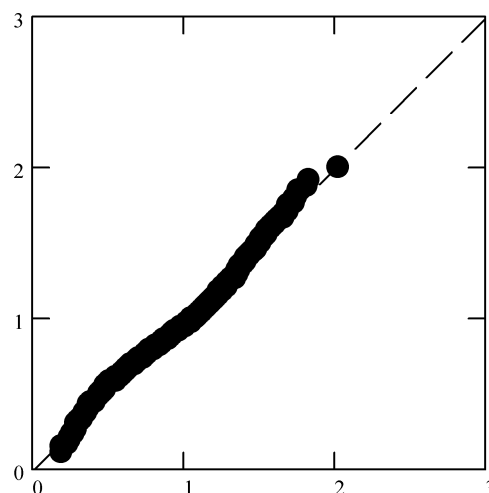


Рис. 3.3. Распределение периодов волн на промежутке квазистационарности: по оси X – квантили экспериментального распределения, по оси Y – квантили распределения Вейбулла

Различия в способах определения периодов волн (по вершине, подошве или по пересечению нулевой линии) обусловили отсутствие единого мнения о виде функции, достаточно хорошо аппроксимирующей распределение периодов волн на промежутке квазистационарности волнового процесса. По нашим данным распределение периодов волн достаточно хорошо аппроксимируется законом Вейбулла с параметром формы $k=3,5$ (рис. 3.3).

Если волновое поле состоит из нескольких систем волн, то $F(x)$ аппроксимируется суммой нескольких распределений Вейбулла (Давидан и др., 1978; Лопатухин, Микулинская, 1984), каждое из которых соответствует своей системе, так, что

$$F(x) = a_1 F_1(x) + a_2 F_2(x) + \dots, \quad (3.2)$$

где a_i – весовые множители, причем $\sum_i a_i = 1$. Коэффициенты a_i определяют вклад каждой системы в общее распределение $F(x)$. Различное сочетание волновых систем приводит к тому, что эмпирические распределения периодов волн смешанного волнения для больших периодов приближаются к смеси распределений Вейбулла.

Условные распределения. Условные распределения элементов волн определяют распределения одного элемента при фиксированном значении другого. Условные распределения периодов волн при фиксированной высоте $F(t|h)$ и высот волн фиксированного пе-

риода $F(h|t)$ аппроксимируются распределениями Вейбулла с параметрами формы, зависящими от соответственно высоты волны и периода.

Напомним, что закон Вейбулла для условных распределений записывается в виде:

$$f(y|x) = \exp(-A_x (\frac{y}{\bar{y}_x})^{k_x}), \quad (3.3)$$

$$A_x = \Gamma^{k_x} (1 + \frac{1}{k}), \text{ где } \bar{y}_x - \text{ регрессия (условное среднее) } y \text{ на } x.$$

Параметры формы условных распределений Вейбулла для различных волновых систем приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2.

Параметры формы условных распределений Вейбулла.

Интервалы изменчивости									
<0,4		0,4-0,8		0,8-1,2		1,2-1,6		1,6-2,0	
h t	t h	h t	t h	h t	t h	h t	t h	h t	t h
1,80	3,24	2,10	3,46	2,76	4,17	3,36	5,10	3,74	5,79

Условной плотности распределения $f(x|y)$ можно поставить в соответствие (Рожков, 1996) функцию регрессии $m_{x/y} = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x|y)dx$, которая является условным математическим ожиданием одной случайной величины при фиксированном значении другой и скедастическую функцию $D_{x/y} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_{x/y})^2 f(x|y)dx$, являющуюся условной дисперсией.

Поведение функции регрессии и скедастической функции для вычисленных условных распределений $f(t|h)$ и $f(h|t)$ отражено на рис. 3.4 и 3.5.

Расчеты, проведенные для нормированных значений h/\bar{h} и t/\bar{t} показали, что условные средние значения периодов волн при фиксированной высоте $m_{t/h}$ и высот волн фиксированного периода $m_{h/t}$ являются зависимыми от h или t только для значений, меньше средних, т.е. зависимость между высотами волн и периодами имеется только для небольших высот волн или периодов, с возрастанием высоты или периода эти два параметра становятся независимыми. Зависимость условных дисперсий $D_{t/h}$ и $D_{h/t}$ от высоты и периода прослеживается на всем диапазоне изменчивости. Параболический вид кривой условной дисперсии указывает на то, что наибольшее разнообразие наблюдается у волн, имеющих близкую к центру распределения высоту.

Двумерные распределения. Более полной вероятностной характеристикой, чем одномерные (маргинальные или условные) распределения, являются двумерные распределения элементов волн $F(x, y)$, которые, исходя из определения двумерного закона:

$$f(x, y) = f(x)f(y|x) = f(y)f(x|y)$$

записываются в виде

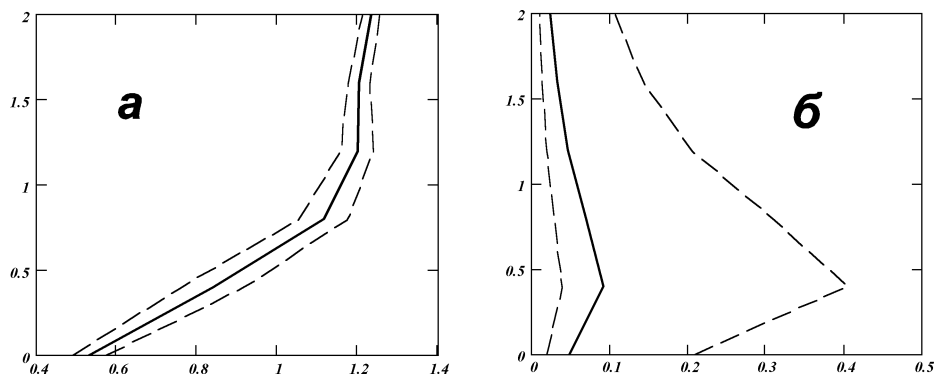


Рис. 3.4. Функции регрессии (а) и скедастические функции (б) условных распределений $h|t$
 а) по оси Y – нормированные значения t / \bar{t} , по оси X – условные средние $m_{h|t}$
 б) по оси Y – нормированные значения t / \bar{t} , по оси X – условные дисперсии $D_{h|t}$

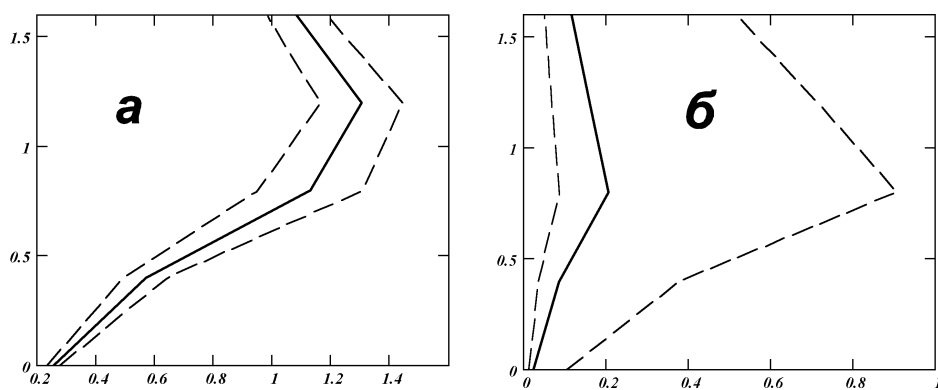


Рис. 3.5. Функции регрессии (а) и скедастические функции (б) условных распределений $h|t$
 а) по оси Y – нормированные значения h / \bar{h} , по оси X – условные средние $m_{t|h}$
 б) по оси Y – нормированные значения h / \bar{h} , по оси X – условные дисперсии $D_{t|h}$

$$F(x, y) = \int_x^\infty F(y | x = x') dF(x'). \quad (3.4)$$

На характер поведения двумерной функции распределения сильное влияние оказывают количество и различия средних значений высот волн и периодов волновых систем, составляющих поле волнения. На рис. 3.6 приведены статистические оценки распределения высот волн и периодов для случаев ветрового и смешанного волнений. Значительные различия в периодах ветрового волнения и зыби обусловили двухвершинность функции распределения смешанного волнения.

Синоптическая изменчивость волнения. Синоптическая изменчивость волнения обусловлена прохождением атмосферных барических образований через район измерений. Характерные временные масштабы этой изменчивости составляют от часов до нескольких суток и десятков суток для открытых океанских акваторий. Вероятностными характеристиками волнения на синоптическом интервале является набор статистик, позво-

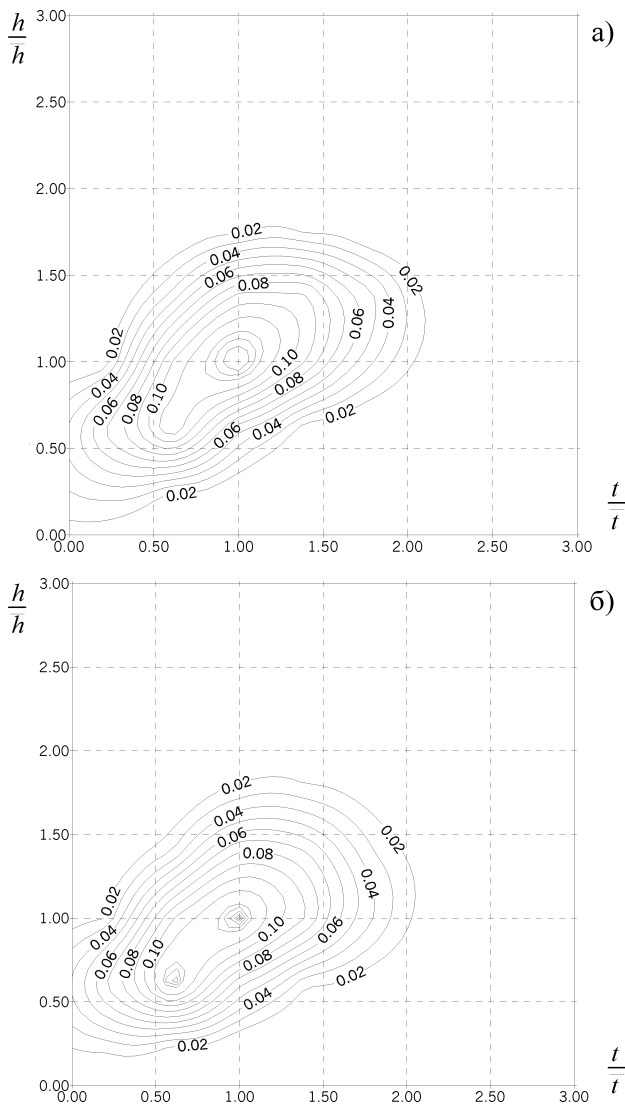


Рис. 3.6. Двумерные распределения элементов волн при разных типах волнения:
а) – ветровое волнение; б) – смешанное волнение

ляющих описать интенсивность и частоту штормовых циклов, темпы роста и ослабления волнения, зависимость максимальных высот волн от продолжительности шторма, закономерности смены характера волнения.

Описание статистических характеристик синоптической изменчивости удобно проводить в терминах выбросов случайного процесса за фиксированный уровень h_p , которые определяются по участкам последовательности высот волн. Основным набором статистик являются длительность штормов t , продолжительность периодов между штормами Θ (так называемые “окна погоды”) и данные о максимальных высотах волн в штормах H_{smax} . Кроме того, вводятся следующие параметры: время роста шторма t_r , асимметрия шторма p , определяемая как отношение t_r/t , скорость роста S_r как отношение $(h - h_p)/t_r$ и количество вторичных значимых максимумов. Пороговый уровень h_p , превышение которого кривой хода средней высоты волны принимается за начало шторма, определялся по средним высотам волн. Кривая хода средних высот волн в рамках межгодовой изменчивости аппроксимировалась полиномом

5-й степени, что дало возможность достаточно точно учитывать сезонные вариации и для каждого шторма вычислять свой уровень h_p .

Указанные характеристики позволяют скорректировать и физически обосновать результаты проведенной классификации методами многомерной статистики штормов и “окон погоды”.

Формы зарегистрированных штормов и “окон погоды” отличаются большим разнообразием, поэтому задача классификации штормов и “окон” по их форме сталкивается с

определенными трудностями. С одной стороны, выделенные типы должны как-то различаться в статистическом смысле, с другой – они должны быть физически интерпретируемы. Поставленная задача решалась методами кластерного и дискриминантного анализов.

Пояснение указанных терминов дано на рис. 3.7.

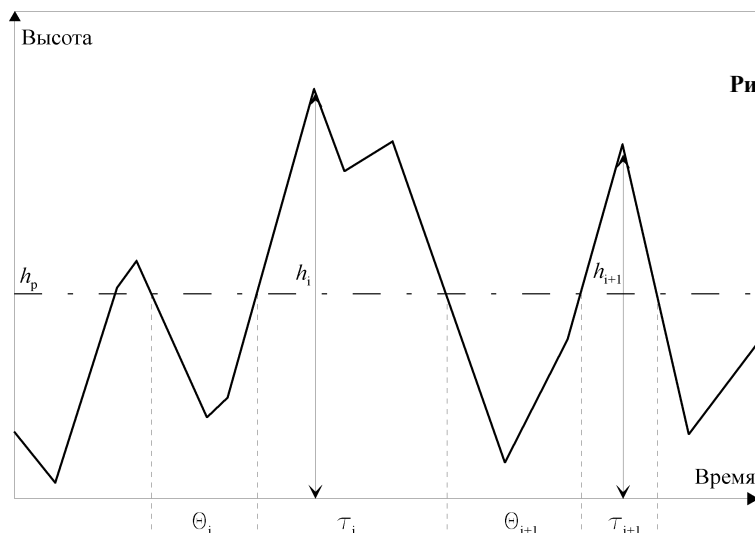


Рис. 3.7. Выделение штормов длительностью t , окон погоды продолжительностью Θ и максимальных высот H_{smax} в штормах при заданном пороговом уровне h_p

Для представления кривой хода каждого шторма $H_{smax} = f(\tau)$ в безразмерном виде ($H_{smax} \in [0;1], \tau \in [0;1]$) шкала времени делилась на l участков, в узлах которых на основе линейной интерполяции определялись высоты волн. Далее по формуле

$$H_i = \frac{H_i - h_p}{H_{i,smax} - h_p}, \text{ где } h_p \text{ – пороговое значение для данного шторма, } H_{i,smax} \text{ – максим}$$

альная высота волны в шторме, кривая хода приводилась к безразмерному виду. Для

“окон” соответственно $H_i = \frac{H_i - H_{i,smin}}{h_p - H_{i,smin}}$, где $H_{i,smin}$ – минимальная высота волны в

шторме. Таким образом, в дальнейшем анализе использовалась сформированная совокупность, состоящая из n объектов (для каждого порогового уровня количество штормов или “окон” n различно) и $p=l+1$ признаков, определенных в каждом объекте. В некоторых случаях для удовлетворения условий дискриминантного анализа количество признаков p уменьшалось.

Кратко остановимся на сути применяемых в дальнейшем к полученной матрице порядка $l \times p$ процедур кластерного и дискриминантного анализов.

В задачу кластеризации входит (Родионов и др., 1987; Дэвис, 1990; Сошникова и др., 1999) определение числа кластеров (собственно, количества типов штормов или “окон”) при условии минимизации p -мерного евклидова расстояния d_{ij} между объектами внутри кластеров и максимизации расстояний между кластерами. d_{ij} определяется по формуле:

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (X_{ik} - X_{jk})^2}{p}}, \quad (3.5)$$

где X_{ik} – значение k -й переменной на i -м объекте и X_{jk} – значение k -й переменной на j -м объекте.

Вначале из физических соображений выбирается вероятное число кластеров g_c . Вычисления начинаются с произвольного разбиения объектов на кластеры так, чтобы центры кластеров были окружены объектами. Центрами служат некоторые объекты из заданного множества. Далее проводится отнесение объектов к тем кластерам, центры которых находятся от них ближе всего (Каждан, Гуськов, 1990). После этого подсчитываются средние значения для кластеров и выполняется следующий шаг. Процедура быстро сходится (не более четырех итераций в нашем случае). Для каждого кластера объекты по соответствующим признакам осредняются и получаются характерные профили хода штормов или “окон”.

Многомерные различия между найденными кластерами (классами количеством g_c) изучаются с помощью некоторых статистических процедур, составляющих основы дискриминантного анализа. Дискриминантный анализ имеет целью построение оптимальной поверхности (дискриминантной функции) в пространстве признаков, разделяющей все пространство на области, соответствующие объектам разных классов (Кендал, Стюарт, 1973; Ким, 1989).

В качестве дискриминантных переменных примем рассчитанные p безразмерных высот волн H , описывающих кривую хода каждого шторма или “окна”. Число определяемых дискриминантных функций q соответствует условию: $q = \min(g_c - 1, p)$, где g_c – число классов. Кроме того, $0 < p < n - 2$, где n – число объектов во всех классах.

Дискриминантные функции представляются в виде линейной комбинации дискриминантных переменных (Лопатухин и др., 1995; Гаранин, 1968):

$$f_{km} = u_0 + \sum_{i=1}^p u_i x_{ikm}, \quad (3.6)$$

где f_{km} – значение дискриминантной функции для m -го объекта в k -й группе, x_{ikm} – значение i -й дискриминантной переменной x для m -го объекта в k -й группе, u_i – коэффициенты разложения, выбираемые из условия, чтобы средние значения для различных классов имели наибольшие различия и значения f_{km} были некоррелированы. Это соотношение задает математическое преобразование p -мерного пространства дискриминантных переменных в q -мерное пространство дискриминантных функций. Коэффициенты u_i в данном уравнении находятся при рассмотрении межгрупповых и внутригрупповых свойств.

Коэффициент ковариации t_{ij} между переменными i и j для всех объектов, вне зависимости принадлежности к какой-либо группе, равен

$$t_{ij} = \sum_{k=1}^{g_c} \sum_{m=1}^{n_k} (x_{ikm} - x_i)(x_{jkm} - x_j), \quad (3.7)$$

где x_{ikm} – значение i -й переменной для m -го объекта в k -й группе, x_i – общее среднее, т.е. среднее i переменных по всем классам, n_k – число наблюдений в k -м классе.

Если вычислить t_{ij} для всех возможных пар переменных, то получим симметричную матрицу общих сумм произведений [T].

Мера ковариации w_{ij} между переменными i и j внутри g_c групп задается формулой:

$$w_{ij} = \sum_{k=1}^{g_c} \sum_{m=1}^{n_k} (x_{ikm} - x_{ik})(x_{jkm} - x_{jk}), \quad (3.8)$$

где x_{ik} – среднее значение i переменной в классе k .

Для всех возможных пар произведений эти коэффициенты образуют матрицу [W], которая представляет сумму произведений между группами.

Дисперсия b_{ij} между группами выражается следующим образом:

$$b_{ij} = \sum_{k=1}^{g_c} (x_i - x_{ik})(x_j - x_{jk}). \quad (3.9)$$

Межгрупповые суммы произведений дают матрицу [B].

Внутригрупповые и межгрупповые суммы квадратов, сложенные вместе, дают общую сумму произведений:

$$[T]=[B]+[W]. \quad (3.10)$$

Желательно, чтобы отношение [B]/[W], которое задает меру различия между группами, было по возможности велико.

Таким образом, построение дискриминантных функций сводится к решению уравнения:

$$\sum_i b_{ji} v_i = \lambda \sum_i w_{ji} v_i \quad (3.11)$$

относительно l и v_i , где l – собственное значение, v_i – последовательность p коэффициентов, при условии $\sum_i v_i^2 = 1$. Максимально существует q нетривиальных решений и они задают искомые коэффициенты u_i :

$$u_i = v_i \sqrt{n_i - g}, \quad u_0 = -\sum_{i=1}^n u_i x_i. \quad (3.12)$$

Абсолютные значения l_i связаны с дискриминирующими возможностями дискриминантных функций, чем больше значение, тем лучше различие. Относительное процентное содержание вкладов, определяемое как $\lambda_i / \sum \lambda_i$, указывает на долю межгрупповой дисперсии.

Зависимость между классами и дискриминантными функциями можно анализировать, используя канонические корреляции:

$$r_i = \sqrt{\frac{\lambda_i}{1 + \lambda_i}}, \quad (3.13)$$

где i – номер соответствующей дискриминантной функции. Малость всех корреляций указывает на недостаточную разделяемость классов по исследуемым признакам.

Характеристикой остаточной дискриминантной способности является L – статистика Уилкса:

$$\Lambda = \prod_{i=k+1}^{g_c} \frac{1}{1 + \lambda_i}, \quad (3.14)$$

где k – число уже вычисленных функций, g_c – число классов. L – статистика характеризует способность переменных различать классы при исключении информации, полученной с помощью ранее определенных функций.

Итак, общая схема классификации штормов и “окон погоды” по их форме выглядит следующим образом.

Строится призначное пространство, состоящее из набора безразмерных высот волн, отражающих форму шторма или “окна”. По физическим характеристикам определяется начальное число классов. С помощью кластерного анализа находятся объекты, попадающие в тот или иной класс, строятся усредненные профили для каждого класса. Методом дискриминантного анализа вычисляются указанные выше критерии и делается вывод о степени удачности принятого деления на классы. При необходимости меняется начальное число классов и процедура повторяется. Конечная цель – выделение типов штормов и “окон”, которые бы разделялись по своей физической природе и были бы достаточно дискриминируемы.

Все вычисления проводились для разных пороговых уровней, определяющих границы штормов и “окон”.

Результаты окончательной классификации приведены в таблице 3.3 (для штормов) и таблице 3.4 (для “окон”). Здесь представлены краткие физические аннотации, зарегистрированное количество при разных уровнях и процентные соотношения от общего количества. Какой-нибудь преобладающий тип шторма при уровне $1h$ не выявлен, доминируют первые четыре типа с вкладом каждого порядка 20%.

С увеличением порогового уровня увеличивается доля развитых штормов за счет отсека из рассмотрения ситуаций с прохождением систем штормов или обширных глубоких циклонов. При уровне $3h$ преобладают “классические” шторма. Штормовые ситуации, трактуемые при уровне $1h$ как отдельные типы V-VIII, с повышением порогового значения, естественно, не обнаруживаются и складывают статистику первых четырех типов. “Окна погоды” при уровне $1h$ в трети случаев характеризуются незначительным волнением. С повышением уровня почти в три раза увеличивается роль V-го типа с волнением, сравнимым с самим уровнем, поскольку усиливается роль процессов при нарастании или затухании штормов. При уровне $3h$ отсутствуют типы III и IV, непосредственно определенные через асимметрию.

Параметры качества типизации штормов и “окон” по результатам дискриминантного анализа приведены в таблицах 3.5 и 3.6. Данные показывают, что при уровне $1h$ для штормов необходимо учитывать три дискриминантные функции, в остальных случаях достаточно двух. В этом случае относительный вклад дискриминантных функций составляет около 90%. Этот факт, а также высокие значения канонических корреляций и небольшие значения L -статистики для первых дискриминантных функций указывают на удачность выбора дискриминантных переменных и качество типизации в целом. На рисунках 3.8 и 3.9 представлены результаты расчетов в плоскости первых двух дискриминантных функций (f_1, f_2) для штормов и “окон” соответственно. Крупными значками указаны положения центроидов групп, т.е. воображаемые точки, координаты которых есть средние значе-

Таблица 3.3.

Классификация штормов.

Тип шторма	Форма шторма	Описание	Уровень					
			Количество			%		
			1h	2h	3h	1h	2h	3h
I		Равномерные усиление и ослабление ветрового потока	39	21	14	20,3	23,1	41,2
II		Сохранение устойчивости ветра на фазе максимального развития шторма	40	39	4	20,8	42,9	11,8
III		Время нарастания существенно превышает период затухания. Характерен для медленных штормов	33	16	7	17,1	17,6	20,6
IV		Выраженная асимметрия формы с преобладанием периода затухания. Свойственен быстрым штормам	37	15	9	19,3	16,4	26,4
V		Выделен в отдельную группу по результатам дискриминантного анализа. Схожесть с типом IV, характерен для быстрых глубоких циклонов	12	*	*	6,3	*	*
VI		Временные усиление-ослабление волнения, связанные с неустойчивостью воздушного потока, формируемого неглубоким или медленным циклоном	8	*	*	4,2	*	*
VII		Прохождение глубокого циклона с четким "разделением" фронтов. В зависимости от траектории движения ветровое волнение развивается на фоне зыби или зыбь как остаточное явление	19	*	*	9,9	*	*
VIII		Прохождение цепочки штормов, не разделяемые при заданном уровне	4	*	*	2,1	*	*

ния переменных в данной группе. Центроид занимает положение типичных наблюдений соответствующего класса. Хорошо заметно, что близкие по физической природе типы находятся рядом, но все же выделяемы. При уровне $1h$ для штормов картина более наглядна в объеме с использованием третьей дискриминантной функции, вклад которой составляет почти 15%. Хорошо прослеживается улучшение качества классификации с увеличением порогового уровня.

Некоторые статистические характеристики штормов и "окон" даны в таблицах 3.7 и 3.8 соответственно. Обозначения следующие: H_{max} – максимальная высота волны в шторме (см), t – его продолжительность (час), p – коэффициент асимметрии шторма (отношение времени нарастания к общей продолжительности), H_w – средняя высота волны в "окне", Q – продолжительность "окна" (час).

Таблица 3.4.

Классификация “окон погоды”.

Тип шторма	Форма шторма	Описание	Уровень					
			Количество			%		
			1h	2h	3h	1h	2h	3h
I		Плавные ослабление-усиление штормовой активности	31	22	16	14,9	22,2	47,1
II		Волнение в “окнах” незначительно по сравнению с выбранным уровнем h	67	17	14	32,2	17,2	41,2
III		Постепенное нарастание штормовой активности или следствие прохождения цепочки штормов различных траекторий	39	14	*	18,8	14,1	*
IV		Сильное остаточное постепенно затухающее волнение после прохождения шторма	49	16	*	23,6	16,2	*
V		Волнение, сравнимое с заданным уровнем h	22	30	4	10,5	30,3	11,7

Таблица 3.5.

Дискриминантные функции (ДФ). Шторма при разных пороговых уровнях.

Уровень 1h

ДФ	Собственное значение	%	Каноническая корреляция	Λ -статистика
1	8,58	50,6	0,94	0,0012
2	4,01	23,7	0,91	0,0117
3	2,43	14,4	0,84	0,0653
4	0,89	5,3	0,69	0,2241
5	0,56	3,3	0,60	0,4234
6	0,29	1,7	0,48	0,6588
7	0,17	1,0	0,38	0,8225

Уровень 2h

ДФ	Собственное значение	%	Каноническая корреляция	Λ -статистика
1	6,48	54,3	0,93	0,0117
2	4,31	36,1	0,90	0,0878
3	1,14	9,6	0,73	0,4663

Уровень 3h

ДФ	Собственное значение	%	Каноническая корреляция	Λ -статистика
1	29,65	68,2	0,98	0,0007
2	10,48	24,0	0,96	0,0199
3	3,38	7,8	0,88	0,2283

Таблица 3.6.

Дискриминантные функции (ДФ). “Окна погоды” при разных пороговых уровнях.

Уровень 1h

ДФ	Собственное значение	%	Каноническая корреляция	Λ -статистика
1	5,94	59,3	0,93	0,0146
2	2,79	27,9	0,86	0,1012
3	0,92	9,2	0,69	0,3838
4	0,36	3,6	0,51	0,7371

Уровень 2h

ДФ	Собственное значение	%	Каноническая корреляция	Λ -статистика
1	13,22	61,8	0,96	0,0029
2	6,49	30,3	0,93	0,1165
3	1,28	6,0	0,75	0,3119
4	0,40	1,9	0,54	0,7121

Уровень 3h

ДФ	Собственное значение	%	Каноническая корреляция	Λ -статистика
1	262,4	96,5	0,99	0,0004
2	9,6	3,5	0,95	0,0947

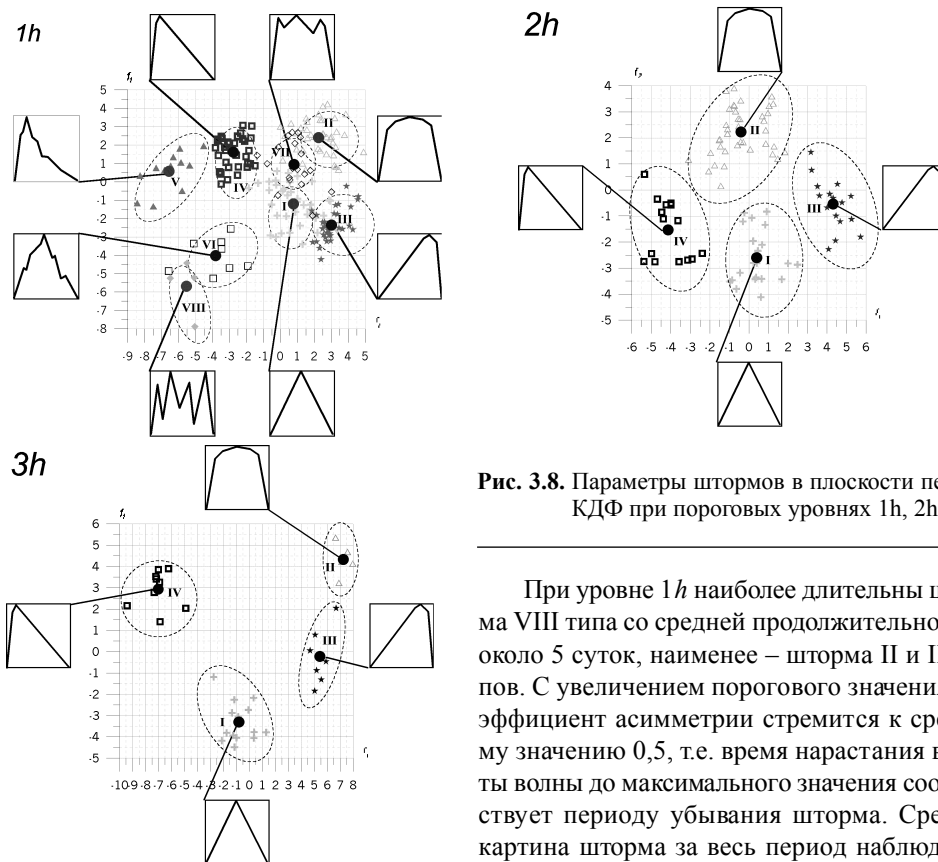


Рис. 3.8. Параметры штормов в плоскости первых КДФ при пороговых уровнях 1h, 2h, 3h

При уровне 1h наиболее длительны шторма VIII типа со средней продолжительностью около 5 суток, наименее – шторма II и III типов. С увеличением порогового значения коэффициент асимметрии стремится к среднему значению 0,5, т.е. время нарастания высоты волны до максимального значения соответствует периоду убывания шторма. Средняя картина шторма за весь период наблюдений

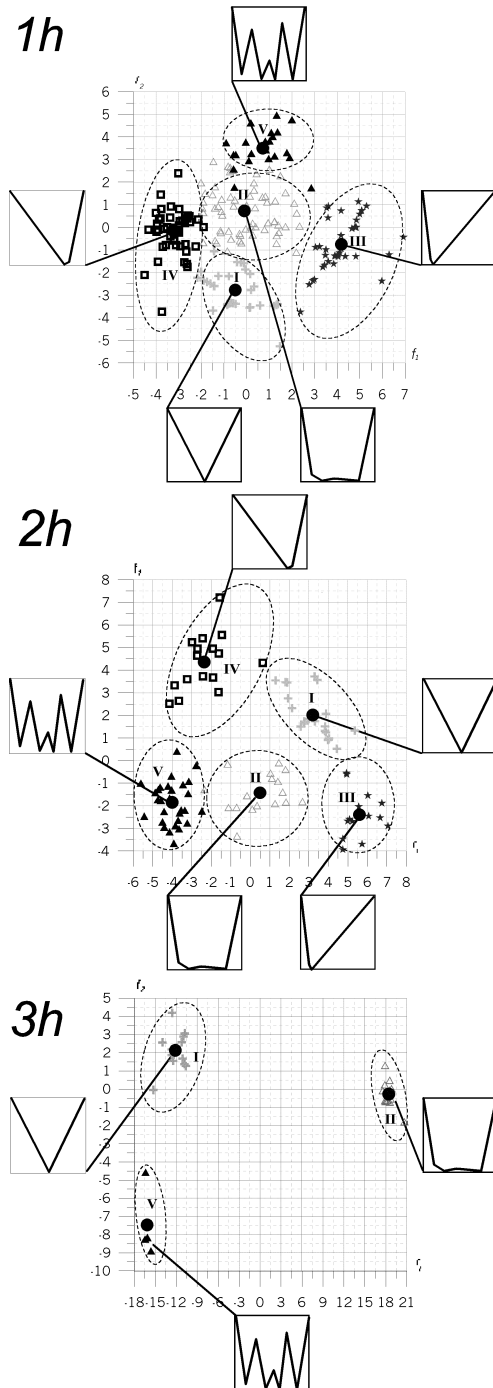


Рис. 3.9. Параметры “окон” в плоскости первых КДФ при пороговых уровнях 1h, 2h, 3h

для уровня 1h выглядит следующим образом: максимальная высота волны порядка 3 метров, продолжительность действия меньше суток, форма почти правильная с коэффициентом асимметрии 0,45; те же параметры характерного шторма для уровня 2h: 4,5 м, 8 ч, 0,45, для уровня 3h: 5,5 м, 5 ч, 0,49. При пороговом уровне 1h среднее “окно погоды” характеризуется волнением с высотой порядка 0,5 м и длительностью около двух суток.

В таблицах 3.9 и 3.10 приведены графики распределения характеристик штормов и “окон” на сетке закона Вейбулла, а также значения параметров формы k этого распределения. Для высот волн параметр формы сильно зависит от порогового уровня, т.к. существенно, какой части функции распределения принадлежат высоты волн. Аппроксимация продолжительности штормов законом Вейбулла вполне удачна при $k=0,8-0,9$, длительность “окон” описывается тем же законом с $k=0,6-0,7$.

Для района Черного моря, примыкающего к северо-восточному побережью, можно выделить три довольно устойчивых гидрологических сезона: зимний (январь, февраль, март, декабрь), летний (май, июнь, июль, август, сентябрь) и переходный (апрель, октябрь, ноябрь). Полученные натурные данные позволили установить зависимости между тройками параметров H_{smax} , t , Q для различных сезонов и уровней. Соответствующие корреляционные матрицы приведены в таблице 3.11. В целом, с повышением порогового значения существенно понижаются зависимости между H_{smax} и t , в то же время растут корреляции между продолжительностью “окон” и характеристиками штормов. Для исследования закономерности переходов штормов и “окон” из одного типа в другой построим матрицы вероятностей перехода, которые составят соответственно данные таблиц 3.12 и 3.13.

Таблица 3.7.

Статистические характеристики штурмов.

Уровень 1h

тип	Минимальные			Максимальные			Средние			Дисперсия			Квантили теоретического распределения								
	H _{сmax} см	t, час	p	H _{сmax} см	t, час	p	H _{сmax} см	t, час	p	H _{сmax} см	t, час	p	0,25		0,50		0,75				
													H _{сmax} см	t, час	H _{сmax} см	t, час	H _{сmax} см	t, час			
I	85	03	019	688	506	064	2656	133	045	1494	146	011	150	32	038	223	66	048	377	221	052
II	99	17	001	339	335	091	2158	98	040	750	71	019	141	54	027	237	77	039	300	128	051
III	78	01	038	479	537	096	1976	71	065	936	100	017	124	20	049	188	49	065	227	71	074
IV	83	05	011	643	684	055	2664	152	030	1417	187	011	171	11	021	229	33	029	307	228	034
V	316	21,1	021	843	550	037	6145	347	028	1876	93	006	489	28,4	023	727	368	029	773	420	035
VI	265	17,1	030	673	560	051	4829	361	041	1366	109	007	388	31,4	036	564	388	043	623	41,5	048
VII	113	23	025	519	669	090	3054	304	062	1277	180	021	196	13,1	039	290	291	071	395	382	078
VIII	498	91,7	013	762	1866	078	6075	1237	043	969	369	028	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Все типы	78	01	001	843	1866	096	2856	182	045	1701	230	020	157	32	03	240	88	043	367	291	055

Уровень 2h

тип	Минимальные			Максимальные			Средние			Дисперсия			Квантили теоретического распределения								
	H _{сmax} см	t, час	p	H _{сmax} см	t, час	p	H _{сmax} см	t, час	p	H _{сmax} см	t, час	p	0,25		0,50		0,75				
													H _{сmax} см	t, час	H _{сmax} см	t, час	H _{сmax} см	t, час			
I	195	05	022	762	239	068	428	42	045	1506	57	012	325	11	037	421	16	046	513	45	051
II	193	15	014	779	338	078	4716	97	044	1589	75	019	377	35	026	432	75	043	599	130	059
III	197	06	020	623	310	099	3541	54	059	1260	74	023	253	19	046	370	28	055	457	59	079
IV	265	04	011	843	353	069	4561	104	034	1416	117	016	394	1,1	023	423	1,4	027	521	21,6	047
Все типы	193	04	011	843	353	099	4383	78	045	1548	84	019	316	1,6	028	421	40	045	521	125	059

Уровень 3h

тип	Минимальные			Максимальные			Средние			Дисперсия			Квантили теоретического распределения								
	H _{сmax} см	t, час	p	H _{сmax} см	t, час	p	H _{сmax} см	t, час	p	H _{сmax} см	t, час	p	0,25		0,50		0,75				
													H _{сmax} см	t, час	H _{сmax} см	t, час	H _{сmax} см	t, час			
I	333	20	021	779	152	088	5601	62	045	1580	40	016	394	3,1	032	564	5,1	046	727	7,1	053
II	406	13	050	773	80	066	5438	31	060	1376	28	006	*	*	*	*	*	*	*	*	*
III	291	090	029	762	35	082	4407	20	061	1559	087	018	336	09	048	362	20	063	578	2,7	078
IV	269	10	005	843	209	056	5399	72	040	1556	72	015	470	1,2	038	567	2,1	042	603	14,5	049
Все типы	269	09	005	843	209	088	5283	52	049	1612	50	018	388	1,7	038	521	3,1	050	633	7,1	056