

**Рис. 3.27.** Изменение среднего числа волн в группах изначально бихроматических волн с гармониками амплитуд равными 0,5 м и частотами, указанными цифрами на рисунке, для разных начальных периодов групп волн. Начальная глубина 8 м, постоянный уклон дна 0,02. а) – весь частотный диапазон (0,06 – 0,34 Гц); б) – частотный диапазон первых гармоник (0,06 – 0,16 Гц)

что можно видеть при сравнении рис. 3.25а, б, в. Этот эффект будет обсужден в следующем подразделе.

**Влияние периода групп волн** Для оценки влияния периода групп волн на процесс трансформации было промоделировано три режима изначально бихроматических волн с

равными амплитудами по 0,5 м и частотами 0,08-0,09 Гц, 0,08-0,1 Гц, 0,08-0,11 Гц (соответственно периоды групп волн изменялись от 100 до 33 секунд, а число волн в группе от 9 до 4). Все волны начинали распространяться с глубины 8 метров над ровным дном с уклоном 0,02. Моделирование проводилось в диапазоне частот от 0 до 0,34 Гц. Обрушение во всех случаях наступало в 200 м от берега (4 м глубины).

Изменение фактора групповитости для полного частотного диапазона и для частотного диапазона первых гармоник приведено на рис. 3.26. Соответствующие изменения среднего числа волн в группах показаны на рис. 3.27. Фактор групповитости уменьшается по мере приближения волны к берегу и лишь на глубинах около 1 метра начинает вновь расти. Уменьшение периода групп волн приводит к увеличению и ускорению изменений фактора групповитости и практически не влияет на изменение среднего числа волн в группах. Среднее число волн в группах немного увеличивается с уменьшением глубины для полного частотного диапазона и уменьшается для диапазона частот первых гармоник. При периодах групп волн 50 и 33 секунд на глубинах от 3 до 1 метров (на расстояниях от берега от 50 до 150 метров) наблюдается практически полное вырождение групповой структуры ( $GF \sim 0,1$ ) за счет интерференции гармоник из различных частотных диапазонов. Это подтверждается отсутствием столь значительного уменьшения для фактора групповитости, рассчитанного по частотному диапазону первых гармоник. При этом высоты низких волн первых гармоник увеличиваются за счет высокочастотных добавок.

В заключение можно сказать, что практически все рассмотренные в данном разделе факторы оказывают влияние на трансформацию групповой структуры. Результат совместного их действия достаточно сложен и должен оцениваться исходя из анализа конкретной ситуации.

### **3.4. Исследование групповой структуры волн в прибрежной зоне Черного моря в районе г. Геленджик**

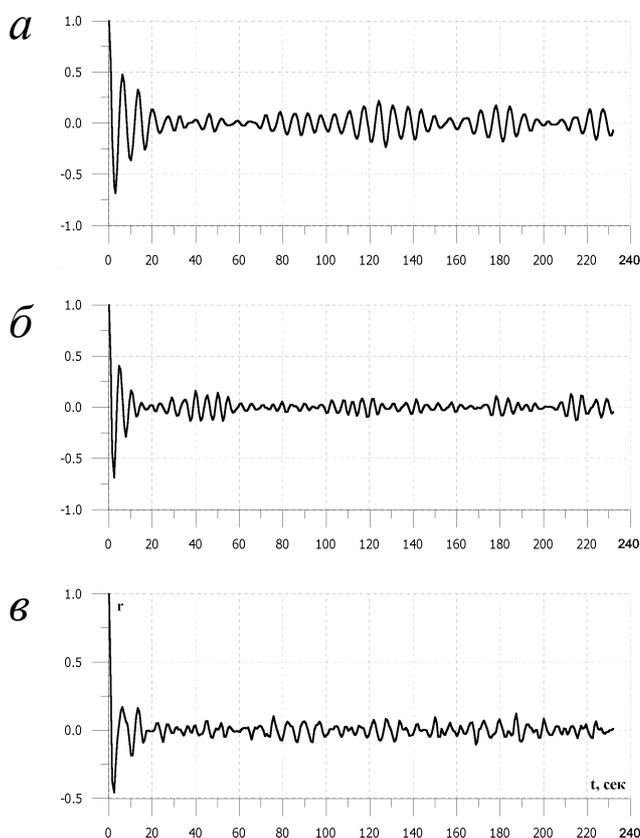
Для определения параметров волнения и групп волн на глубокой воде использовался уникальный непрерывный двухлетний ряд наблюдений за ветровым волнением на входе в прибрежную зону Северо-Кавказского побережья Черного моря, полученный измерительным бумом голландской фирмы DATAWELL (Kos'yan et al., 1998). Буй находился с октября 1996 года по июнь 1998 года в 7 км от берега на глубине 90 м на траверзе города Геленджика и работал в автономном режиме, передавая информацию на берег по радиоканалу.

Возвышения свободной поверхности регистрировались каждые три часа при малых высотах волн и каждый час во время штормов. Длина серии измерений возвышений свободной поверхности составляла 20 минут с частотой опроса датчика волнения 1,28 Гц (дискретность – 0,78125 секунды). За время наблюдений было получено более 6100 записей возвышений свободной поверхности, использованных для анализа.

Для описания групповой структуры волн используются два подхода, которые условно можно назвать “статистическим” и “спектральным”. Первый рассматривает групповую структуру как изменчивость дискретной последовательности высот волн, определенных по методу “пересечения нулевой линии”, а второй основан на анализе свойств огибающей волн, построенной по непрерывному ряду возвышений свободной поверхности.

**Групповая структура волн на основе “статистического” подхода** Для ветрового волнения характерна групповая структура, проявляющаяся в цикличности волнового про-

цесса. Это свойство присуще волнению независимо от стадии его развития, типа и интенсивности. При анализе волнограмм как реализаций квазистационарного случайного процесса о групповых свойствах волнения можно судить по наличию циклических участков на коррелограммах и по раздвоению вершины частотного спектра. Анализ имеющихся в распоряжении записей морского волнения позволил установить типичные автокорреляционные функции волнения при сильноразвитой групповой структуре, умеренно и слабо развитой (рис. 3.28). Начальный участок автокорреляционной функции (до первого минимума огибающей) имеет вид затухающей косинусоиды и характеризует особенности внутригруппового строения волн. За его пределами автокорреляционная функция представляет собой слабозатухающую флуктуирующую функцию с биениями в виде последовательности циклически повторяющихся участков, являющихся следствием групповой структуры волнения.



**Рис. 3.28.** Автокорреляционные функции при сильно (а), умеренно (б) и слабо развитой (в) групповой структуре волн

Для объединенных выборок, состоящих из волнограмм, соответствующих волнению с сильно-, умеренно- и слабо развитой групповой структурой рассчитаны параметры групп волн: высота (максимальное значение, нормированное на среднее)  $H$ , период  $T$  и число волн  $N$ .

Наряду со спектральными характеристиками, раскрывающими структуру явления, при описании вероятностных свойств волн широко используются распределения их элементов. Аналогичным способом групповые свойства волнения могут быть охарактеризованы через распределения элементов групп волн. В этом случае геометрическим объектом является группа волн с присущим ей характерными элементами: высотой, периодом и числом волн.

В практике расчетов группы волн рассматриваются как последовательность подряд идущих волн, в которой наибольшая высота  $h^0$  превышает среднюю высоту, рассчитанную по всей последовательности волн, а слева и справа от  $h_{cp}$  располагаются волны с меньшими высотами. Наименьшие волны в такой последовательности, имеющие высоту менее  $h_{cp}$ , являются границами групп.

Значения указанных параметров приведены в таблице 3.15.

Таблица 3.15.

Параметры выделенных групп волн

Параметры групп волн		Выборки, объединенные по степени развития групповой структуры			Все
		слаборазвитая	умеренноразвитая	сильноразвитая	
H	среднее	0,42	0,70	0,93	0,73
	стандарт	0,14	0,37	0,52	0,42
T	среднее	16,5	22,1	25,7	22,5
	стандарт	4,3	7,5	9,6	8,1
N	среднее	4,7	4,9	4,6	4,9
	стандарт	1,4	1,8	1,8	1,8

На рис. 3.29 и 3.30 представлены распределения высот волн в группах и периодов групп на вероятностных сетках распределений Вейбулла и логнормального в терминах квантиль-квантиль (q-q) и вероятность-вероятность (p-p).

Регрессия H на T при разном количестве волн в группе независимо от типа волнения приведена на рис. 3.31.

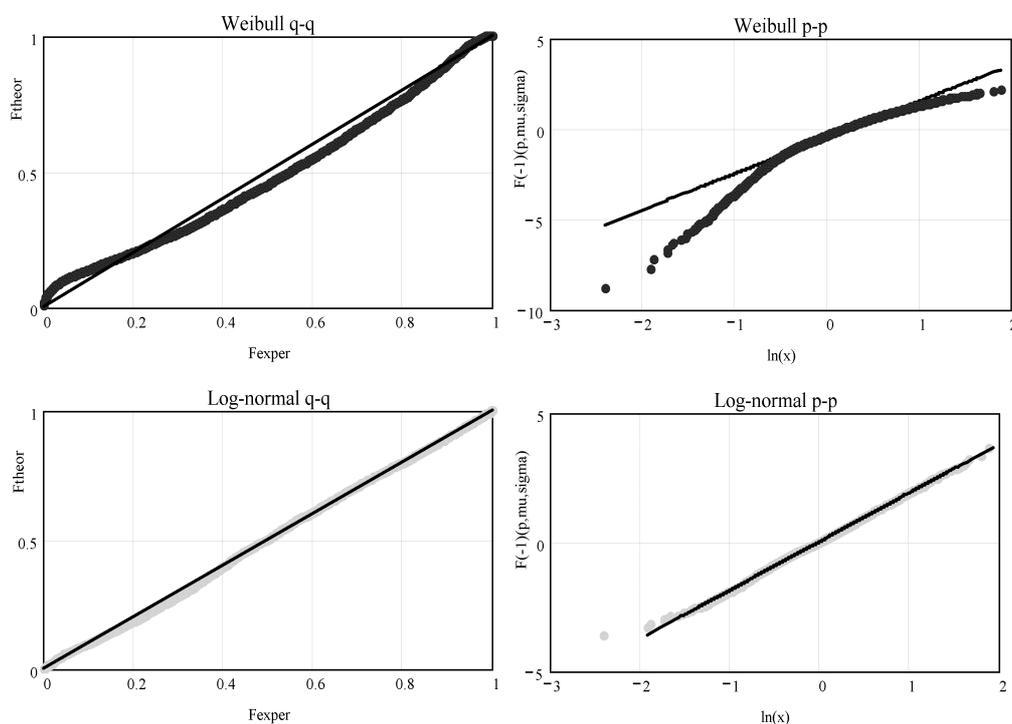
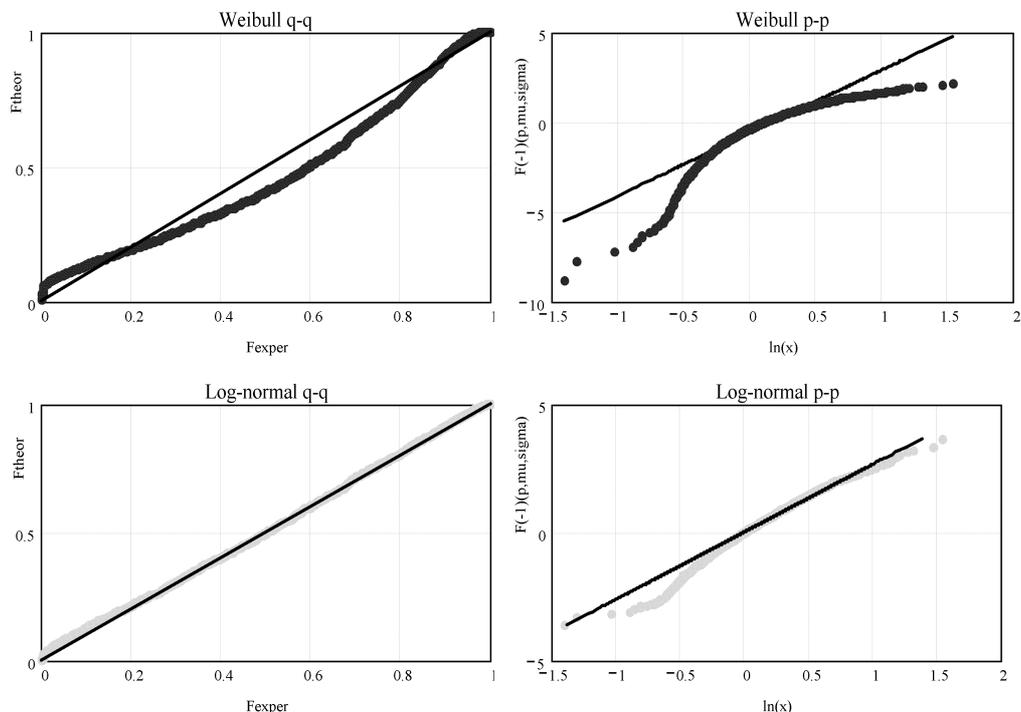


Рис. 3.29. Высоты волн на сетках распределений Вейбулла и логнормального. По оси X – экспериментальная функция распределения, по оси Y – теоретическая

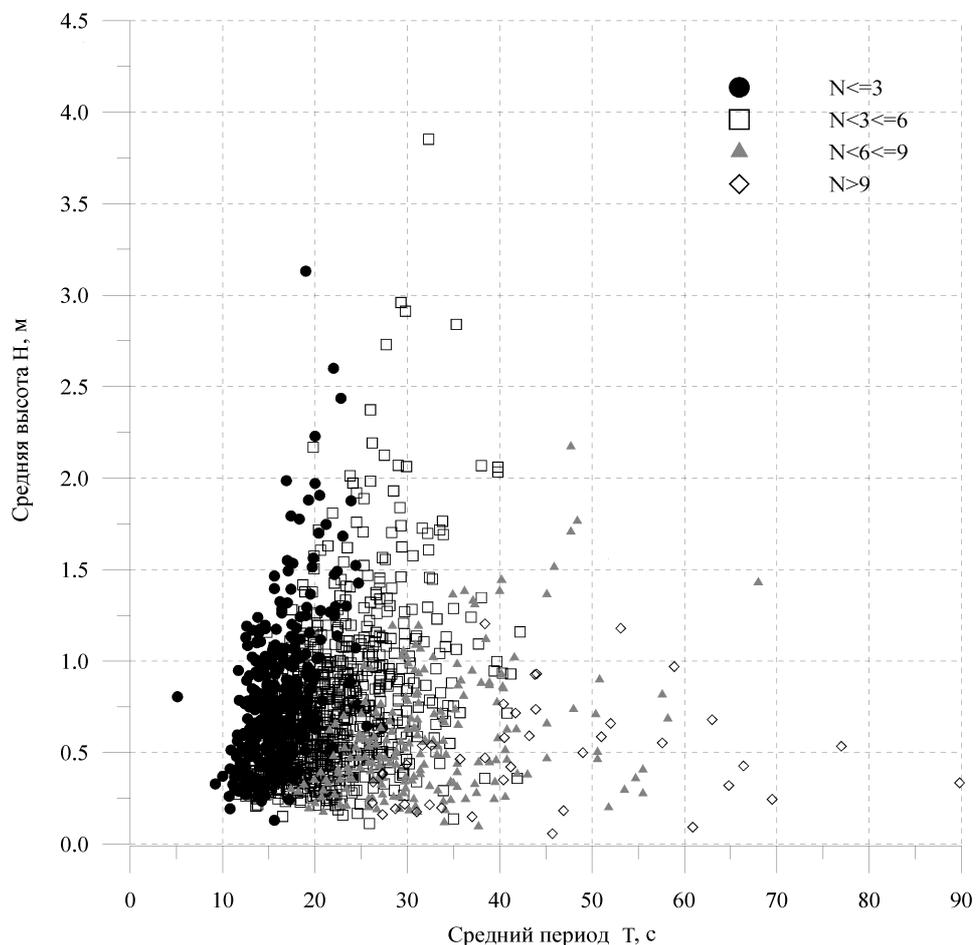


**Рис. 3.30.** Периоды волн на сетках распределений Вейбулла и логнормального. По оси X – экспериментальная функция распределения, по оси Y – теоретическая

Таким образом, на основе анализа обширного экспериментального материала выявлено, что:

- число волн в группе колеблется от 2 до 17, в среднем 5 волн;
- степень развития групповой структуры практически не зависит от типа волнения и количества волновых систем;
- параметры групп волн удовлетворительно спрямляются на сетке логнормального распределения.

**Групповая структура волн на основе “спектрального” подхода** Ввиду отсутствия строго обоснованного единого мнения о причинах образования групповой структуры волн (см. введение к разделу 3.3) представляется разумным исходить из экспериментальных данных для определения свойств групповой структуры и ее изменчивости. Будем как и раньше характеризовать групповую структуру волн двумя параметрами – фактором групповитости (GF), показывающим величину амплитудной модуляции волн и средним числом волн в группе (NW). Методика их расчета описана в разделе 3.3. Огибающие волн, используемые для расчета GF и NW, строились с помощью преобразования Гильберта отфильтрованных рядов возвышений свободной поверхности. Численная фильтрация оставляла в спектре волн лишь частоты  $f$ , лежащие в диапазоне  $0,6f_m < f < 2f_m$ , где  $f_m$  – частота максимума спектра волн, что позволяло избежать влияния инфрагравитационных волн, а так же инструментальных дрейфов и высокочастотных шумов. Кроме этого использовались следующие величины для характеристики режимов волн:



**Рис. 3.31.** Зависимость между средней высотой волны в группе и средним периодом группы. N – среднее количество волн в группе

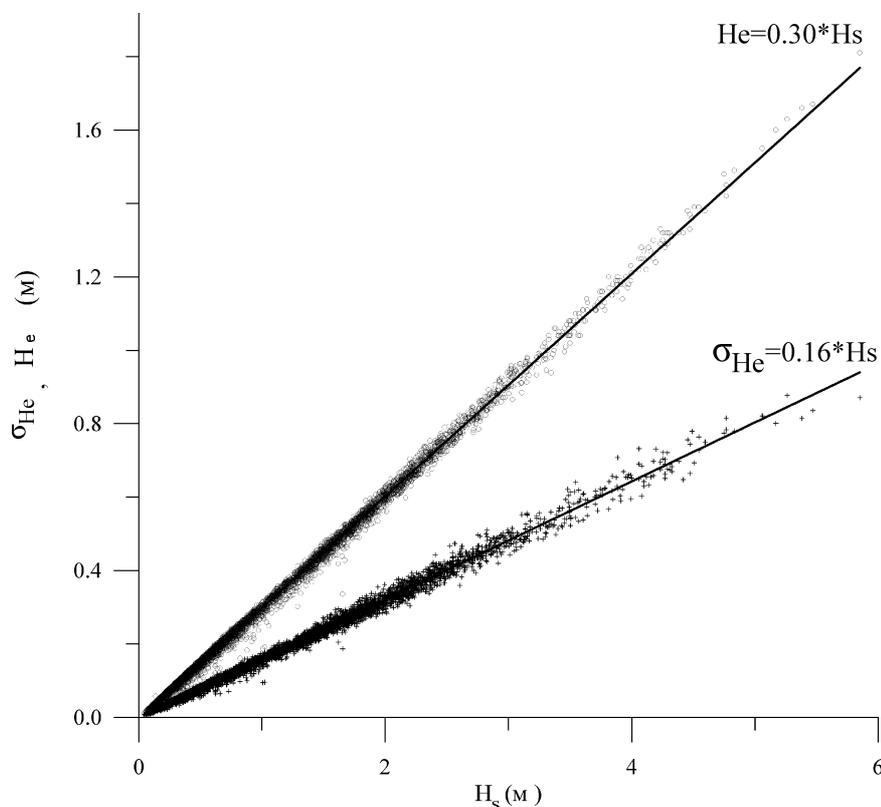
– средняя частота спектра волн ( $\bar{f}$ ) и средняя частота спектра огибающей волн ( $\bar{f}_e$ ), рассчитывающиеся как отношение соответствующих первого спектрального момента к

нулевому (моменты частотного спектра  $m_i = \int_0^{\infty} f^i S_i(f) df$ ),  $S_i$ - спектр);

– ширина спектра огибающей волн ( $\omega_e$ ) и ширина спектра волн ( $\omega_h$ ), введенные Лонге-Хиггинсом М.С. (1962) и рассчитанные как  $m_2 m_0 / m_1^2 - 1$ ;

– ширина спектра волн ( $\omega_s$ ), определяемая по уровню 0,7 от максимального значения спектра.

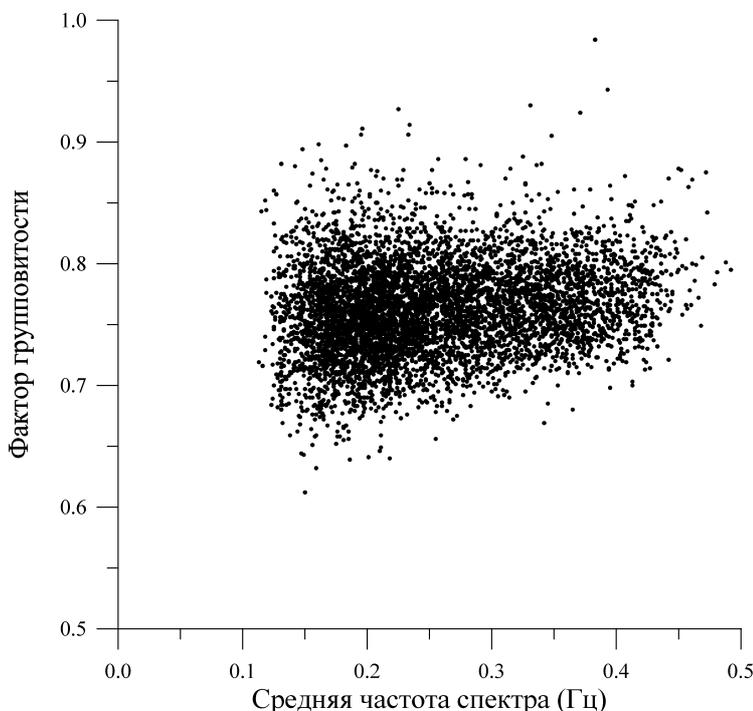
Все представленные в этом подразделе эмпирические зависимости построены по 6117 реализациям поверхностного волнения, полученным автономным бумом (см. введение к разделу 3.4).



**Рис. 3.32.** Зависимость среднего значения высоты огибающей волн ( $H_e$ ) и стандартного отклонения огибающей от среднего значения ( $\nu_{He}$ ) от высоты значительных волн ( $H_s$ )

Оказалось, что среднее значение огибающей волн ( $H_e$ ) линейно связано с высотой значительных волн ( $H_s$ ), которая традиционно характеризует среднюю высоту третьей части наиболее высоких волн из числа всех наблюдавшихся, и принимается равной четырем величинам среднеквадратичного значения возвышений свободной поверхности воды (далее просто волн) (рис. 3.32). На рис. 3.32 также представлена зависимость  $\sigma_{He}$  от  $H_s$ , которая тоже получилась линейной, с очень малым разбросом точек относительно прямой  $\sigma_{He} = 0.16 H_s$ . Полученные линейные зависимости свидетельствуют о возможной автомодельности групповой структуры волн на глубокой воде.

Действительно, GF, пропорциональный отношению среднеквадратичной величины флуктуаций огибающей к ее среднему значению, по всей видимости, не зависит от параметров волн и изменяется в относительно узком диапазоне значений от 0,65 до 0,85, среднее значение GF по всему наблюдаемому ряду равно 0,76. Зависимость (точнее ее отсутствие) фактора групповитости от средней частоты волн показана на рис. 3.33. Зависимости GF от  $\omega_s$ ,  $\omega_e$ ,  $\omega_h$ ,  $f_m$ ,  $f_e$  построены, имеют вид облаков точек без явно выраженных тенденций, сходный с рис. 3.33 и здесь не приводятся. Таким образом, по-видимому, значения GF на глубокой воде определяются лишь нелинейными свойствами процесса распространения волн и не зависят явно от параметров волн и условий волнообразования. Среднее значение GF по всему наблюдаемому ряду равно 0,76.



**Рис. 3.33.** Зависимость фактора групповости от средней частоты спектра

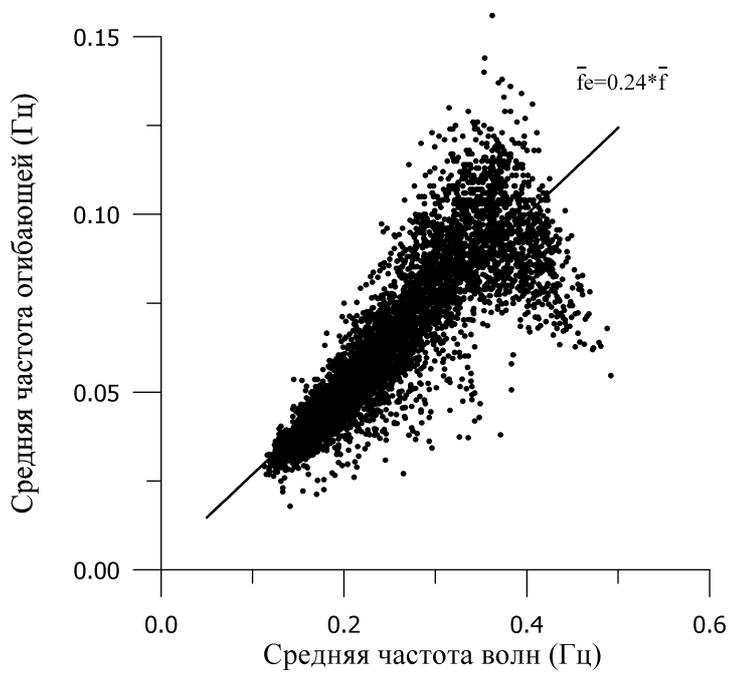
Аналогичные зависимости построены для среднего числа волн в группе (NW). Достаточно хорошая линейная зависимость  $\bar{f}_e$  от  $\bar{f}$  ( $\bar{f}_e = 0.24 \bar{f}$ ) так же свидетельствует об автомодельности среднего числа волн в группе (рис. 3.34). Большой разброс точек при малых высотах волн и коротких периодах волн, по-видимому, определяется ошибками измерения волн при слабых режимах волнения. Построенные зависимости NW от  $\omega_s$ ,  $\omega_e$ ,  $\omega_h$ ,  $\bar{f}$ ,  $\bar{f}_e$ ,  $\sigma_{He}$  и  $H_s$  имеют вид облака точек без выраженных тенденций и здесь не приводятся. Среднее значение NW равно 4.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о том, что значения GF на глубокой воде определяются лишь нелинейными свойствами процесса распространения волн и не зависят явно от параметров волн и условий волнообразования, а NW остается постоянным для всех наблюдаемых режимов волнения

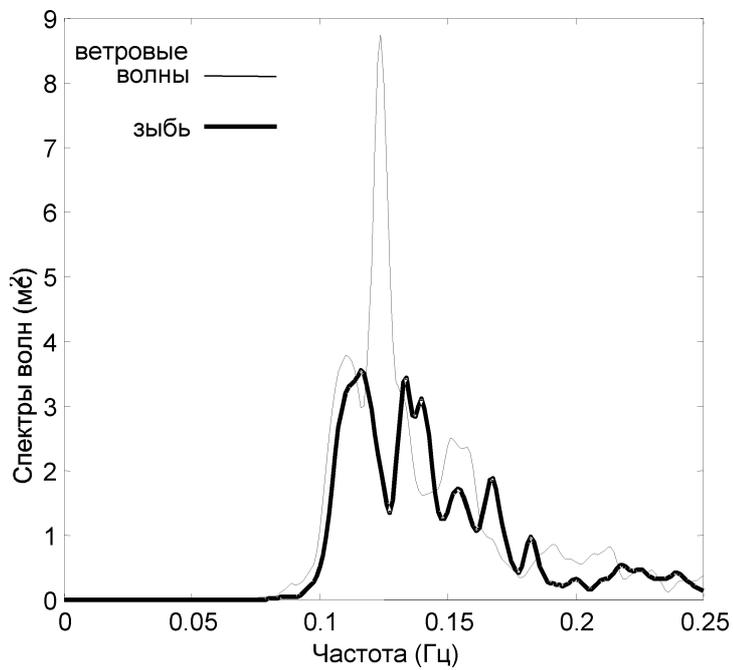
#### **Моделирование трансформации групповой структуры волн в районе г. Геленджик.**

На основе проведенных в двух предыдущих подразделах исследований были выбраны два типичных волновых режима, один – ветровое волнение (высота значительных волн 2,3 м, период около 8 секунд), имевшее место в 23 часа 29 января 1997 года, другой – зыбь (высота значительных волн 2,3 м, период около 8 секунд), наблюдавшаяся в 13 часов 17 января того же года. Спектры волн типичных режимов приведены на рис. 3.35.

Зыбь аппроксимировалась бихроматическими волнами с амплитудами начальных гармоник равными 0,4 м и соответствующими частотами 0,115 и 0,135 Гц. Ветровое волнение аппроксимировалась тремя гармониками с амплитудами 0,4 м, 0,6 м и 0,3 м и частотами 0,11 Гц, 0,125 Гц и 0,15 Гц соответственно. Амплитуды гармоник выбирались пропорционально значениям спектров на соответствующих частотах так, чтобы дисперсия возвышений свободной поверхности модельных волн совпадала с дисперсией измерен-



**Рис. 3.34.** Зависимость средней частоты оггибающей от средней частоты волн



**Рис. 3.35.** Типичные спектры ветрового волнения и зыби

ных. Ограничения используемой модели по глубине позволяли моделировать частоты до 0,34 Гц. Максимальная относительная высота волн  $\gamma$  бралась равной 0,8, как и при тестировании модели параметров при трансформации моделировалось над двумя различ-

ными профилями, начиная с глубины 10 м, в предположении, что спектр волнения на глубокой воде при приближении волн к берегу практически не меняется до этой глубины. Для моделирования были использованы типичные рельефы дна (Владимиров, 1954): профиль 217 (район м. Дооб, средний уклон 0,037) и профиль 229 (к западу от мыса Тонкий, средний уклон 0,029). Профиль 217 имеет подводный уступ, а 229 – практически прямолинейный. Схема расположения тестовых участков приведена на рис. 3.36.

Местоположения точек обрушения, выявленные при моделировании приведены в таблице 3.16.

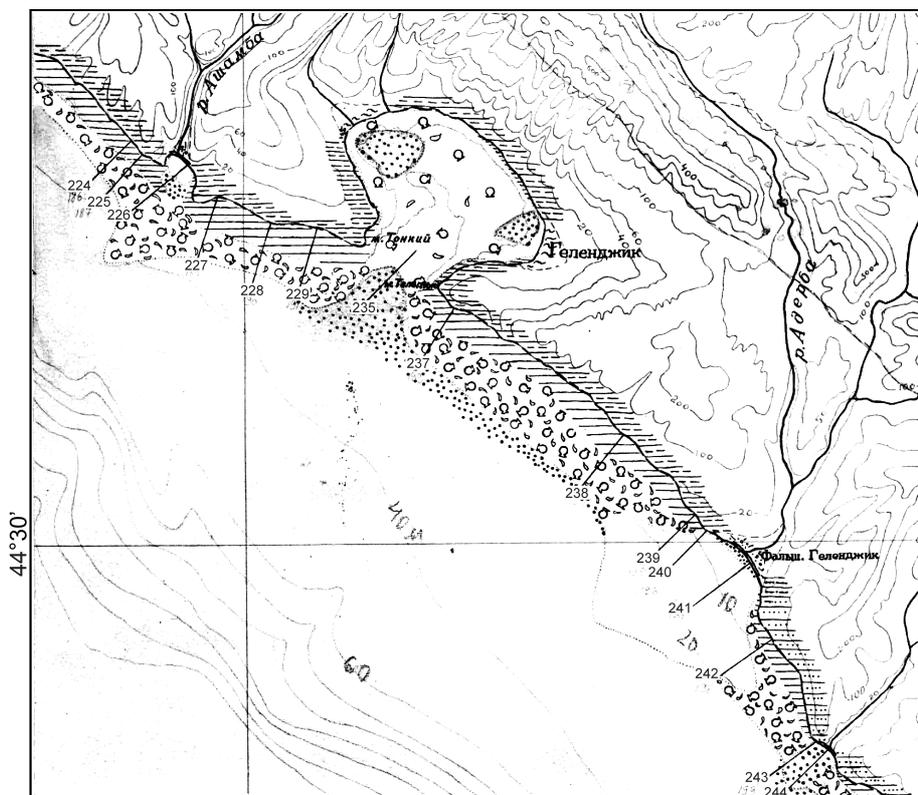


Рис. 3.36. Карта побережья Черного моря в районе г. Геленджика (Владимиров, 1954) с указанием мест расположения профилей дна, использованных для моделирования. Использовались профили дна 217 (район м. Дооб) и 229 (к западу от мыса Тонкий)

Таблица 3.16.

Местоположения точек обрушения

Профиль	Местоположение точки обрушения волн (в метрах от берега)	
	Зыбь	Ветровые волны
229	128	160
217		
первое обрушение	от 125 до 102	от 127 до 81
второе обрушение	от 69	от 75

Результаты моделирования показали, что процесс трансформации групповой структуры зыби и ветровых волн над выбранными профилями происходит примерно одинаково. Поэтому в дальнейшем будем приводить рисунки только для волн зыби, отдельно оговаривая отличия для ветровых волн.

На рис. 3.37 и 3.38 представлены изменения модельных спектров при приближении волн к берегу (а) и профили дна (б). На рис. 3.39 и 3.40, соответственно, изменения среднего числа волн в группе и фактора групповитости над выбранными профилями. Периоды групп волн сохраняются вплоть до берега. Резкое увеличение среднего числа волн во внутренней части прибойной зоны (см. рис. 3.39а, глубина 3,5 м; см. рис. 3.39б, глубина 2,3 м) возникает за счет изменения средней частоты волн при сохранении среднего периода групп волн. В этой зоне большая часть энергии волн концентрируется в частотном диапазоне вторых гармоник (см. рис. 3.37, расстояние 150 м; см. рис. 3.38, расстояние 100 м) и, соответственно, средняя частота волн увеличивается – эффект достаточно хорошо описанный в опубликованных научных работах (Madsen et al., 1996). При этом над профилем 217 среднее число волн увеличивается почти в два раза, так как амплитуда второй гармоники в этом случае становится больше первой и средняя частота удваивается.

Фактор групповитости, рассчитанный по полному частотному диапазону (GF, частоты от 0,06 до 0,34 Гц) и фактор групповитости, рассчитанный по частотному диапазону первых гармоник (GF1, частоты от 0,06 до 0,2 Гц), в целом, испытывая колебания, уменьшаются к берегу над обоими профилями (рис. 3.40). Колебания GF1 и GF объясняются

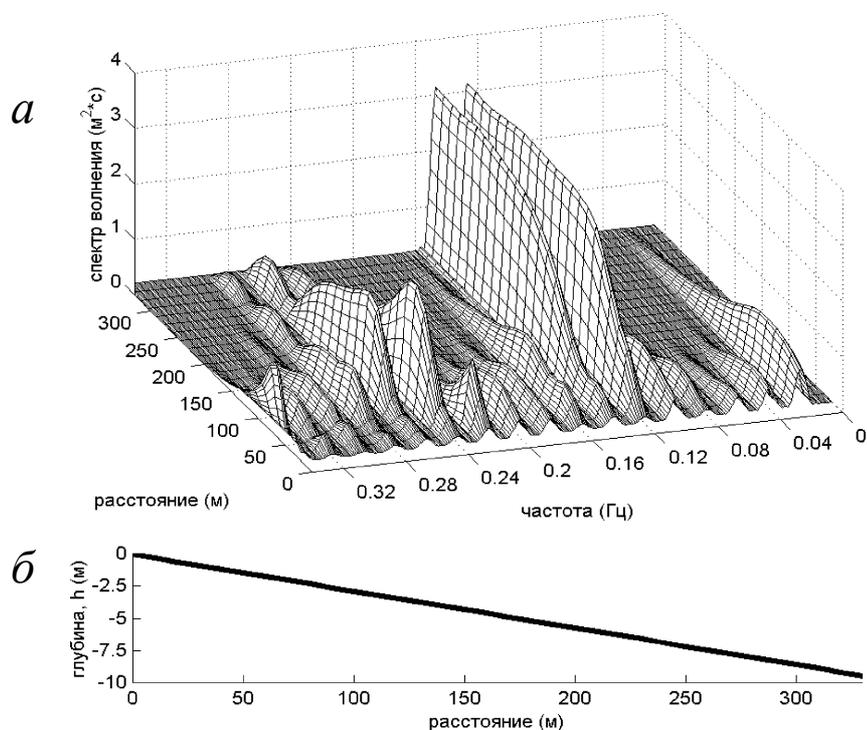


Рис. 3.37. Изменения модельного спектра для волн зыби (а) над профилем 229 (б)

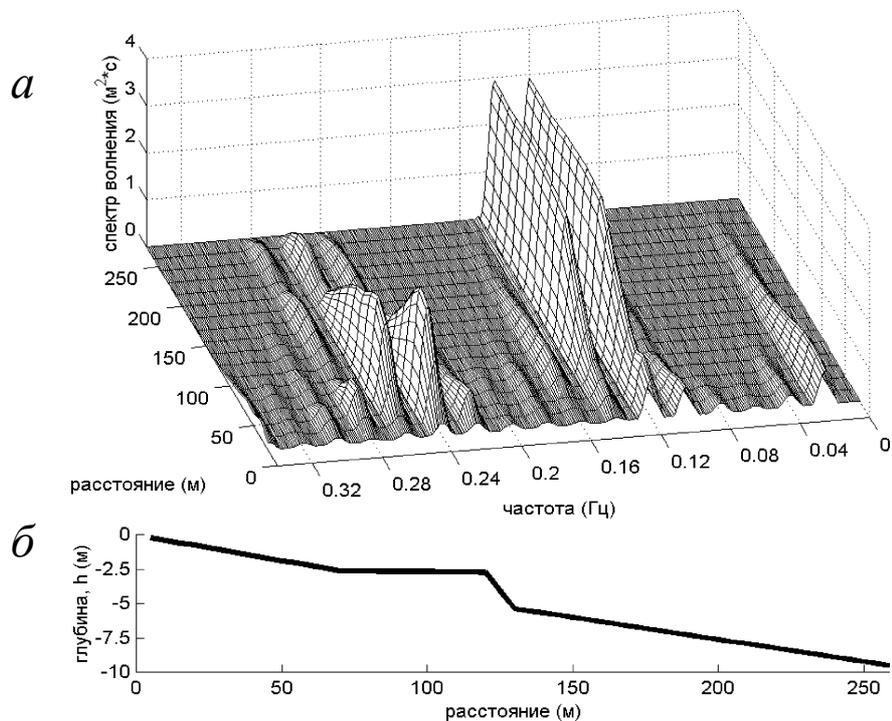


Рис. 3.38. Изменения модельного спектра для волн зыби (а) над профилем 217 (б)

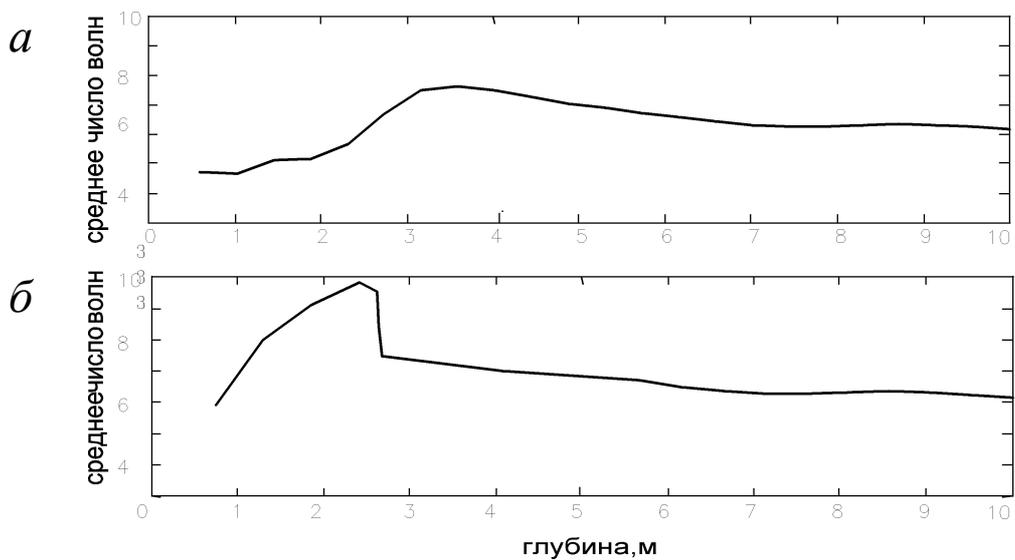
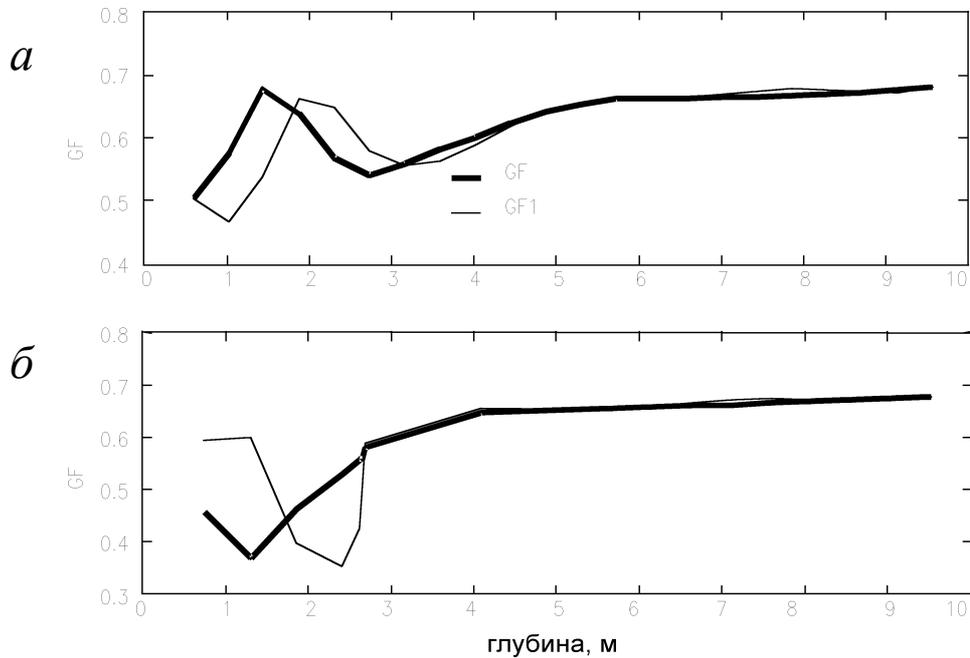
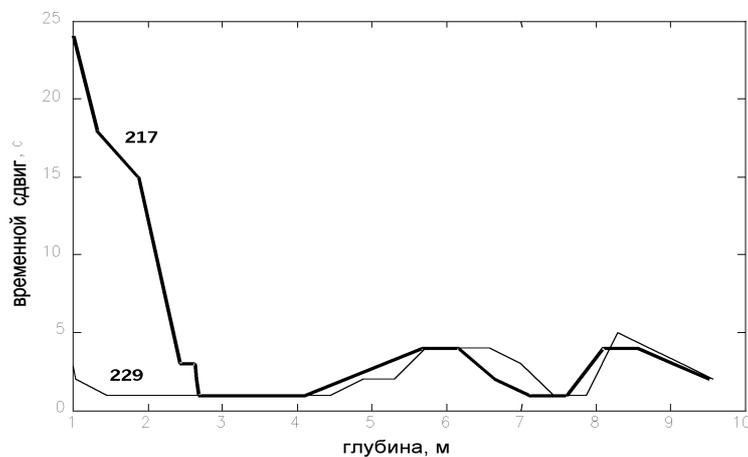


Рис. 3.39. Изменение среднего числа волн в группе над профилями 229 (а) и 217 (б)



**Рис. 3.40.** Изменения общего фактора групповитости (GF) и фактора групповитости диапазона первых гармоник (GF1) над профилями 229 (а) и 217 (б)



**Рис. 3.41.** Сдвиг огибающей первых гармоник относительно огибающей вторых гармоник над профилями 229 и 217

периодическим обменом энергией между первыми и высшими гармониками и периодическим появлением и исчезновением новых частот в спектре волн (см. рис. 3.37 и 3.38).

На обоих профилях начальный процесс трансформации волн и их групповой структуры (до 3 м глубины) происходит по одному сценарию: огибающие первых и образующихся высших гармоник меняются синфазно во времени. Но если на профиле 229 эта

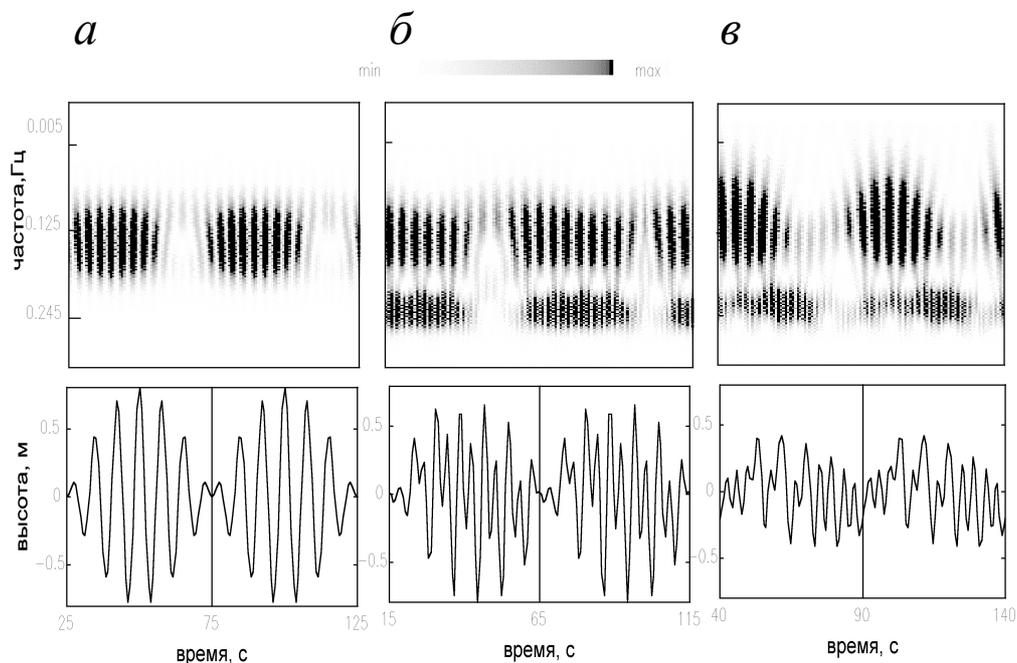


Рис. 3.42. Возвышения свободной поверхности двух групп волн и их вейвлет-преобразования на разных расстояниях от берега: а) 275 м; б) 80 м; в) 35 м

синфазность сохраняется до самого берега, то на профиле 217, из-за уступа, во внутренней части прибойной зоны, огибающие вторых гармоник начинают отставать от огибающих первых, что демонстрируется временными задержками, определяемыми по сдвигу максимума взаимно корреляционной функции огибающих первых и вторых гармоник (рис. 3.41, глубина 2,5 м).

Отставание огибающей вторых гармоник подтверждается и вейвлет-анализом возвышений свободной поверхности, показывающим изменения частотного состава волн во времени. На рис. 3.42 представлены возвышения свободной поверхности для двух групп волн над профилем 217 на разных расстояниях от берега и соответствующие им вейвлет преобразования. Интенсивность цвета передает величины вейвлет-коэффициентов, первым и вторым гармоникам соответствуют частоты 0,125 и 0,25 Гц. Имея вначале бихроматическую структуру (рис. 3.42а, 275 м от берега), волны далее трансформируется за счет появления высших гармоник, группы которых некоторое время распространяются синфазно с группами первых гармоник (рис. 3.42б, 80 м от берега), а затем постепенно отстают от них (рис. 3.42в, 35 м от берега). Над ровным профилем 229 таких изменений не происходит, и волны равномерно затухают, а групповая структура деградирует заметно медленнее, чем над профилем 217 с уступом.

При распространении групп волн к берегу возникают инфрагравитационные волны, амплитуда которых в целом для ветровых волн выше, чем для зыби, что объясняется большей энергией ветровых волн. В то же время на рис. 3.37 и 3.38 видно, что амплитуда инфрагравитационных волн над профилем с уступом в 1,5 – 2 раза меньше, чем над равномерно повышающимся дном.

Обобщая результаты моделирования типичных волновых режимов можно отметить, что изменения фактора групповитости и среднего числа волн в группе подобны для разного рельефа дна: при приближении волн к берегу факторы групповитости, как GF, так и GF1, уменьшаются, периоды групп волн сохраняются, а среднее число волн в группе локально увеличивается за счет увеличения средней частоты спектра. Выявленные различия трансформации групп волн, связанные с особенностями рельефа, могут оказаться чрезвычайно важными при оценке взвешивания и транспорта осадков и прогноза образования тягунов в портах и гаванях.

---