

Рис. 3.14. Хронограмма двух периодов групп волн и ее вейвлет преобразование для изначально бихроматических волн с частотами 0,1 и 0,11 Гц и равными начальными амплитудами $a_1=a_2=0,5$ м над горизонтальным дном с глубиной 4 м:
 а) на расстоянии 40 метров от начала трансформации;
 б) на расстоянии 330 метров от начала трансформации

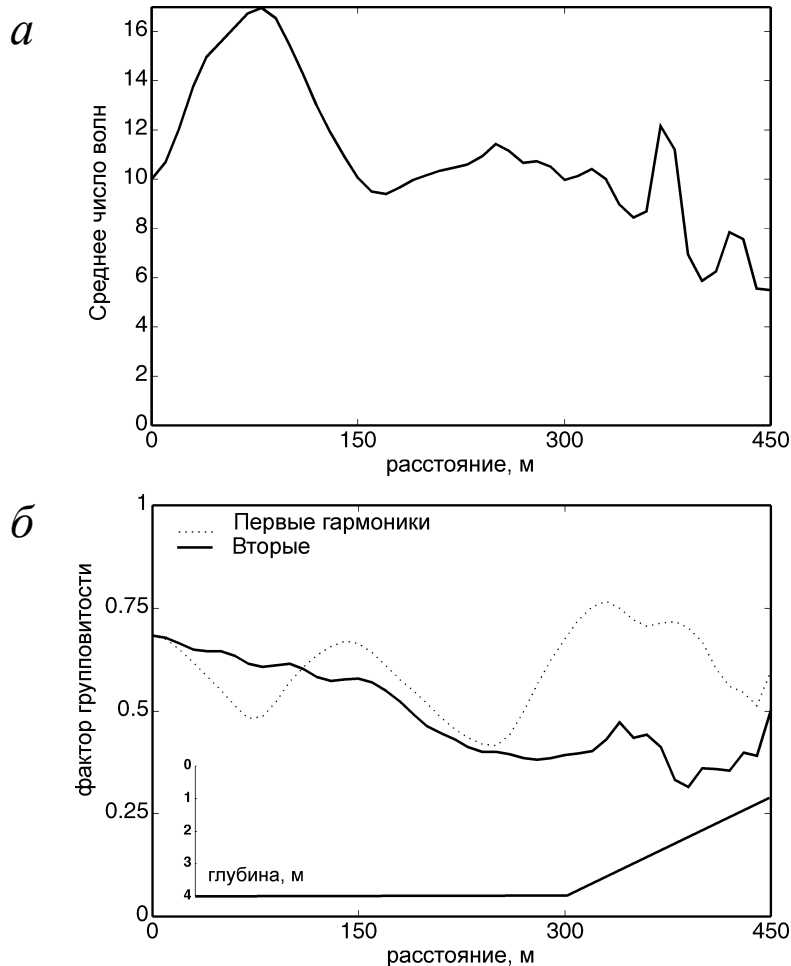


Рис. 3.15. Изменение фактора групповости (а) и среднего числа волн в группах (б) для изначально бихроматических волн с частотами 0,1 и 0,11 Гц и равными начальными амплитудами $a_1=a_2=0,5$ м над горизонтальным с глубиной 4 м, а затем наклонным дном с уклоном 0,02

дами 0,5 м, распространяющимися в сторону берега с глубины 8 м над прямолинейным дном с уклоном 0,02. Небольшая диссипация энергии волн за счет обрушения начинается с глубины 3,8 м (расстояние 210 м) и ее скорость равномерно возрастает с приближением к берегу. Решение было рассчитано для гармоник в диапазоне частот от 0,02 Гц до 0,06 Гц с шагом 0,02 Гц.

На рис. 3.16а показано изменение модулей амплитуд гармоник возвышений свободной поверхности по мере приближения волн к берегу. Хорошо заметны их колебания. Уменьшение энергии первых гармоник на участке 0 – 210 м происходит только за счет передачи энергии высшим гармоникам, а далее так же благодаря диссипации при обрушении волн. На рис. 3.16б приведены рассчитанные факторы групповости. Уменьшение факторов групповости на расстояниях 0 – 210 метров происходит только за счет перестройки частотной структуры гармоник в отсутствии обрушения. Обрушение, начав-

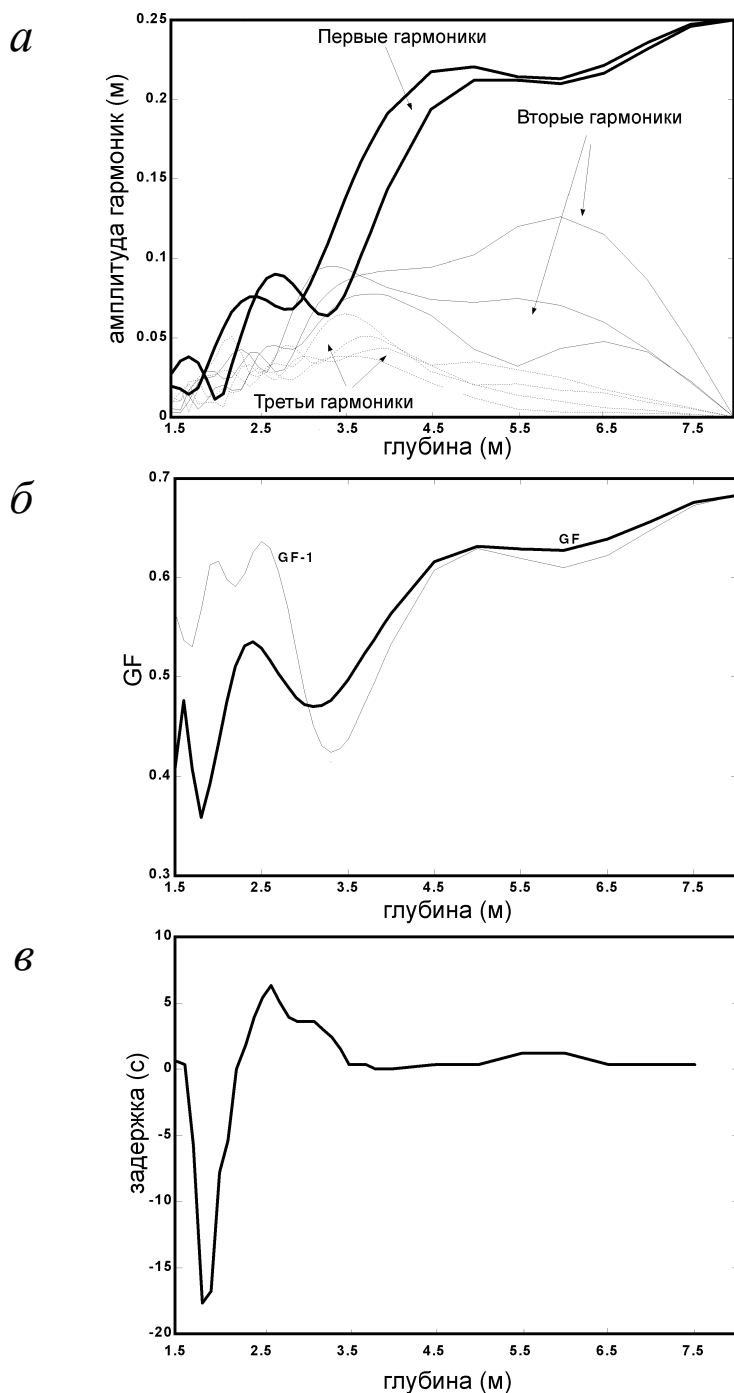


Рис. 3.16. Изменения амплитуд гармоник возвышений свободной поверхности (а), фактора групповитости (б) и временной задержки огибающей первых гармоник относительно огибающей вторых гармоник (в)

шееся на расстоянии 210 м, совпадает с началом роста факторов групповитости. Рассчитанное поведение GF качественно совпадает с результатами лабораторных экспериментов Мазе (Mase, 1989) по трансформации нерегулярных волн над прямолинейным дном с наклоном 0,05. Среднее число волн изменяется в диапазоне от 4 до 6 и на рисунках не приводится.

Эффект “заполнения” в этом случае наблюдается лишь на расстояниях больших 225 метров, что отражается в увеличении GF1 относительно GF и подтверждается появлением задержки огибающей первых гармоник относительно огибающей вторых гармоник, определяемой по сдвигу максимума взаимной корреляционной функции (см. рис. 3.16в).

На рис. 3.17 показано последовательное изменение вида спектров возвышений свободной поверхности по мере приближения волн к берегу. Гармоники периодически обмениваются энергией. Например, гармоника с частотой 0,22 Гц, появившаяся в результате квадратичного взаимодействия двух начальных гармоник, растет при распространении волны с глубины 7 м до 6 м, затем убывает на глубине 5 м и опять увеличивается на глубине 4,2 м. Аналогичные изменения ясно видны и для гармоник с частотами 0,26 Гц и 0,12 Гц в зоне обрушения волн на глубинах 3,4 м – 1,8 м. На фоне общего уменьшения энергии волн их относительная величина становится меньше при переходе от 3,4 м на 2,6 м и опять увеличивается на 1,8 м. Другой интересной особенностью трансформации спектров является “уширение” спектра в области частот первых гармоник. На глубине 4,2 м возникает пик на частоте 0,14 Гц, а на глубине 3,4 метра практически весь диапазон частот между первыми и вторыми гармониками оказывается заполненным вновь возникшими гармониками, и визуальное разделение диапазонов частот первых и вторых гармоник становится невозможным.

На рис. 3.18 приведены участки хронограмм волн, соответствующих спектрам, показанным на рис. 3.17. По мере приближения волн к берегу заметны периодические изменения симметрии волн относительно горизонтальной и вертикальной осей, что неизбежно должно приводить к пространственным флуктуациям коэффициентов асимметрии и эксцесса, чрезвычайно важных для описания многих динамических процессов в береговой зоне моря (Guza, Thornton, 1985). Наиболее ярко изменения симметрии проявляются для волны помеченной на рис. 3.18 тонкой стрелкой. Почти симметричная на глубине 8 м, она приобретает широкий гребень и узкие ложбины по его краям на глубине 7 м, затем на глубине 6 м ее передний фронт становится пологим, а задний – крутым, и на глубине 5 м эта волна опять становится почти симметричной по вертикальной оси, но уже с острым гребнем и относительно пологими ложбинами. Интересно, что волна, следующая через одну после рассматриваемой и помеченная толстой стрелкой, имеет противоположную асимметрию относительно вертикальной оси.

На рис. 3.18 визуально заметна деградация групповой структуры по мере приближения волн к берегу и заполнение промежутков между группами больших волн с частотами первых гармоник высокочастотными волнами диапазона вторых и третьих гармоник, как и в случае трансформации бихроматических волн над плоским дном. Более подробно заполнение промежутков между группами больших волн продемонстрировано на рис. 3.19, где приведены хронограмма возвышений свободной поверхности с отфильтрованными инфрагравитационными частотами и хронограммы волн частотных диапазонов первой, второй и третьей гармоник, а также их огибающие на глубине 4,6 м. Огибающие вторых и третьих гармоник сдвинуты по фазе относительно огибающей первых гармоник, огибающая вторых – вперед по времени (и, соответственно, по направлению

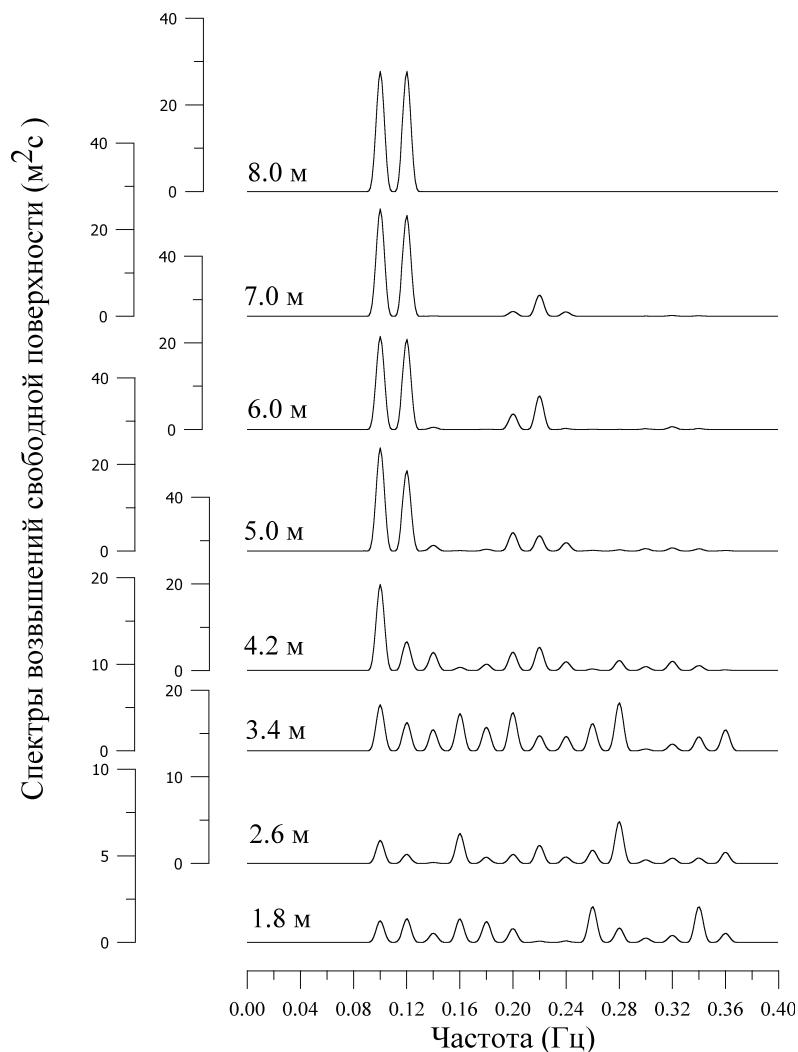


Рис. 3.17. Изменение спектров изначально бихроматических волн над наклонным дном по мере их приближения к берегу. Инфрависитационные гармоники отфильтрованы. В левой части спектра цифрами показана глубина для каждой расчетной точки

распространения в пространстве), огибающая третьих гармоник – назад. Это приводит к тому, что большие волны частотного диапазона первых гармоник имеют относительно маленькие высшие гармоники, а маленькие волны частотного диапазона первой гармоники – большие высшие.

Ввиду сложности картины пока не представляется возможным установить однозначного соответствия между GF и особенностями частотной структуры. Можно лишь с определенностью сказать, что диссипация энергии при обрушении волн не оказывает видимого воздействия на GF и NW, а пространственные масштабы изменений GF квазипериодичны и примерно соответствуют характерным для рассматриваемых волн величинам L_b ,

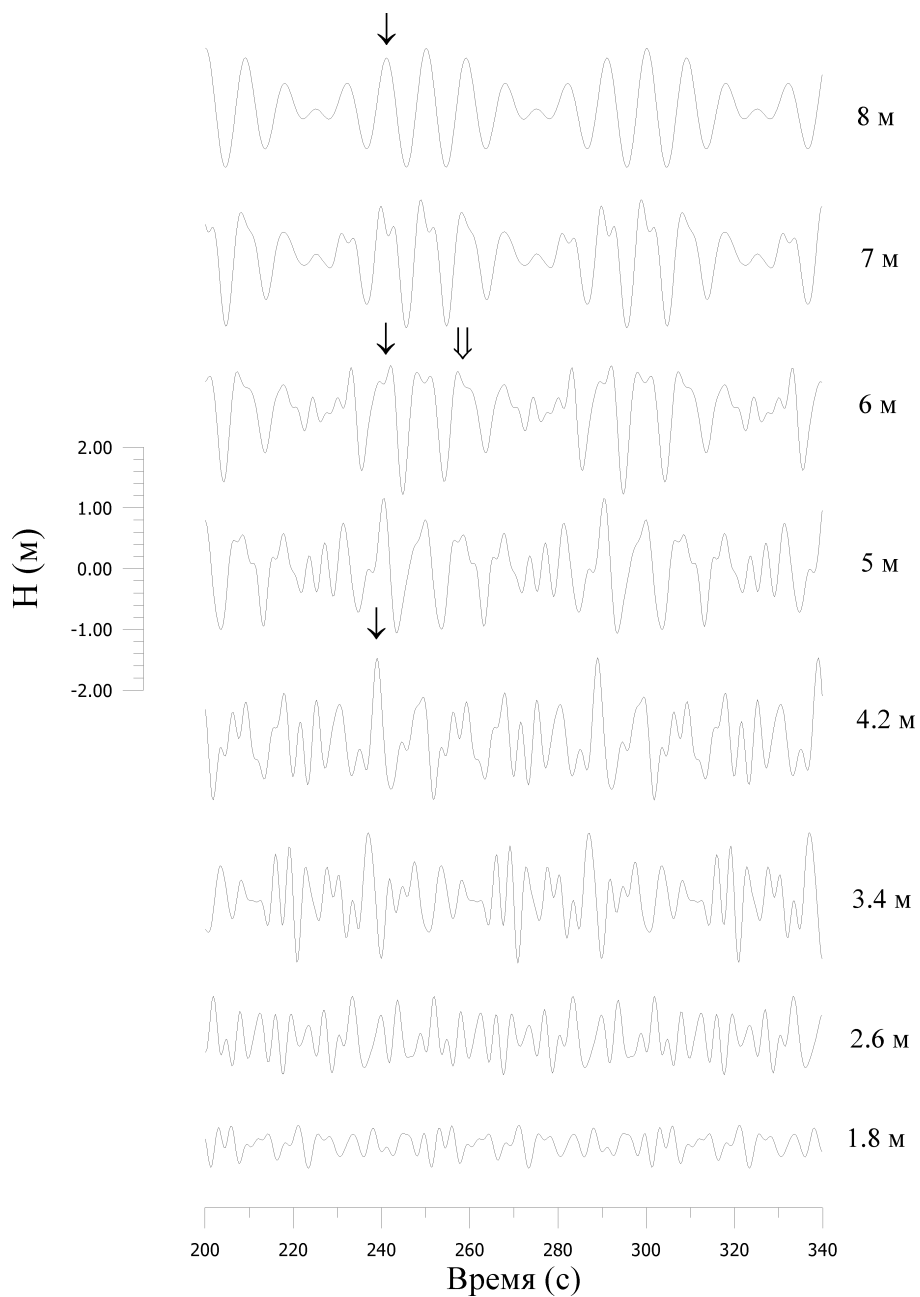


Рис. 3.18. Изменение хронограмм изначально бихроматических волн над наклонным дном по мере их приближения к берегу. Глубина в каждой точке обозначена цифрами в правой части. Инфразгравитационные гармоники отфильтрованы

а нелинейные процессы являются основной причиной их изменений. Уменьшение фактора групповитости (GF) по мере приближения волн к берегу происходит по крайней мере

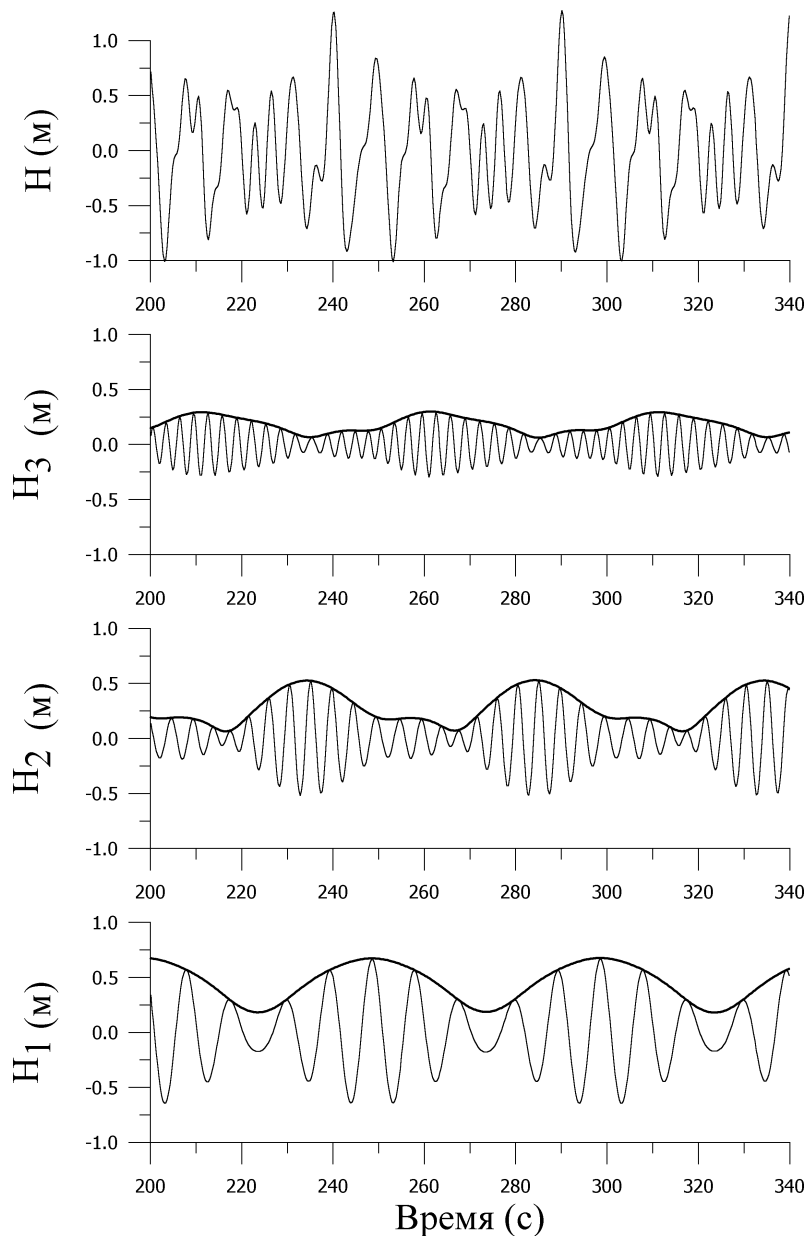


Рис. 3.19. Распределение интенсивности колебаний в частотных диапазонах первых (H_1), вторых (H_2) и третьих (H_3) гармоник и хронограмма волнения (H). Толстыми линиями показаны огибающие, тонкими – волны. Изначально бихроматические волны над наклонным дном. Глубина 4,6 м

по двум причинам: 1) за счет нелинейной перестройки спектра волн в области частот первых гармоник; 2) за счет заполнения промежутков между группами первых гармоник группами высших гармоник.

Влияние уклона дна Для оценки влияния уклона дна на процесс трансформации было промоделировано десять режимов изначально бихроматических волн. Пять из них с частотами начальных гармоник 0,1 Гц и 0,11 Гц. Другие пять с частотами 0,1 Гц и 0,12 Гц. Амплитуды начальных гармоник брались равными 0,5 м, волны распространялись к берегу с глубины 8 м над прямолинейным ровным дном с уклонами от 0,01 до 0,05. Данные начальные значения обеспечивают высоту максимальных волн 2 метра и число волн в группах примерно 10 и 5 (периоды групп волн 100 секунд и 50 секунд, соответственно). Предельная относительная высота волны была взята равной 0,8. Обрушение волн началось примерно на одинаковой глубине (4 м) для всех режимов.

На рисунках 3.20а и 3.21а показано влияние наклона дна на изменение фактора групповитости (GF) с изменением глубины для периодов групп волн 100 и 50 секунд, соответственно. На рисунках 3.20б и 3.21б показано влияние наклона дна на изменение среднего числа волн в группе (NW). Цифрами на рисунке показаны уклоны дна. NW растет на начальном этапе деформации волн и затем резко падает. При всех наклонах дна GF убывает, испытывая колебания, а затем, с глубин 2-3 метра, начинает увеличиваться только для уклона 0,01.

GF и NW флуктуируют квазипериодически, следуя периодическим изменениям спектрального состава волн. Величина квазипериода определяется величиной L_b , которая в свою очередь зависит от глубины в соответствии с дисперсионным соотношением. Таким образом, периодичность флуктуаций GF и NW по мере изменения глубины определяется двумя факторами: пробегом волн между одним и тем же перепадом глубин (зависимость от уклона дна), так и самой глубиной. При малых уклонах дна (0,01-0,02) доминирует влияние пробега, что отражается в значительных изменениях квазипериода при увеличении уклона дна от 0,01 до 0,02. При больших уклонах доминирует влияние глубины, что приводит к незначительным изменениям квазипериодов при изменении уклона дна от 0,03 до 0,05. Очевидно, что над наклонным дном мы можем наблюдать один-два квазипериода изменений GF и NW или только часть его в зависимости от величины уклона дна. Обрушение, начинавшееся в модели для разных уклонов дна в диапазоне от 3,5 м до 3,8 м, явным образом не меняет поведения GF и NW.

Дополнительной причиной резкого различия результатов над уклоном 0,01 и 0,02 – 0,05 является различия вкладов линейного и диссипативного членов исходных уравнений. Проведенные оценки показали, что для уклона 0,01 преобладает диссипативный член, а на больших уклонах дна вклады этих членов примерно равны. Характерным для изменения GF является отсутствие явно видимого влияния обрушения волн. Различия, показанные на рис. 3.20б и 3.21б, отражают влияние периода групп волн, которые будут обсуждаться ниже в соответствующем подразделе.

Анализ причин изменчивости NW показал, что этот параметр очень чувствителен к развитию обертонов (частот, близких к первоначально присутствующим в спектре) в диапазонах частот как первой гармоники, так и высших, кратных ей. По мере распространения волны рост обертонов и их интерференция приводит к образованию очень коротких групп волн или даже к полному вырождению групповой структуры, когда каждая вторая волна является “высокой”. Типичный спектр волн с развившимися обертонами показан на рис. 3.22. В натуральных условиях этот эффект сглаживается нерегулярностью волнения, и в результате изменения NW, становятся не столь значительными.

Для уклона 0,01 ярко проявляется эффект заполнения промежутков между группами больших волн высокочастотными волнами. Над уклоном 0,02 этот эффект проявляется

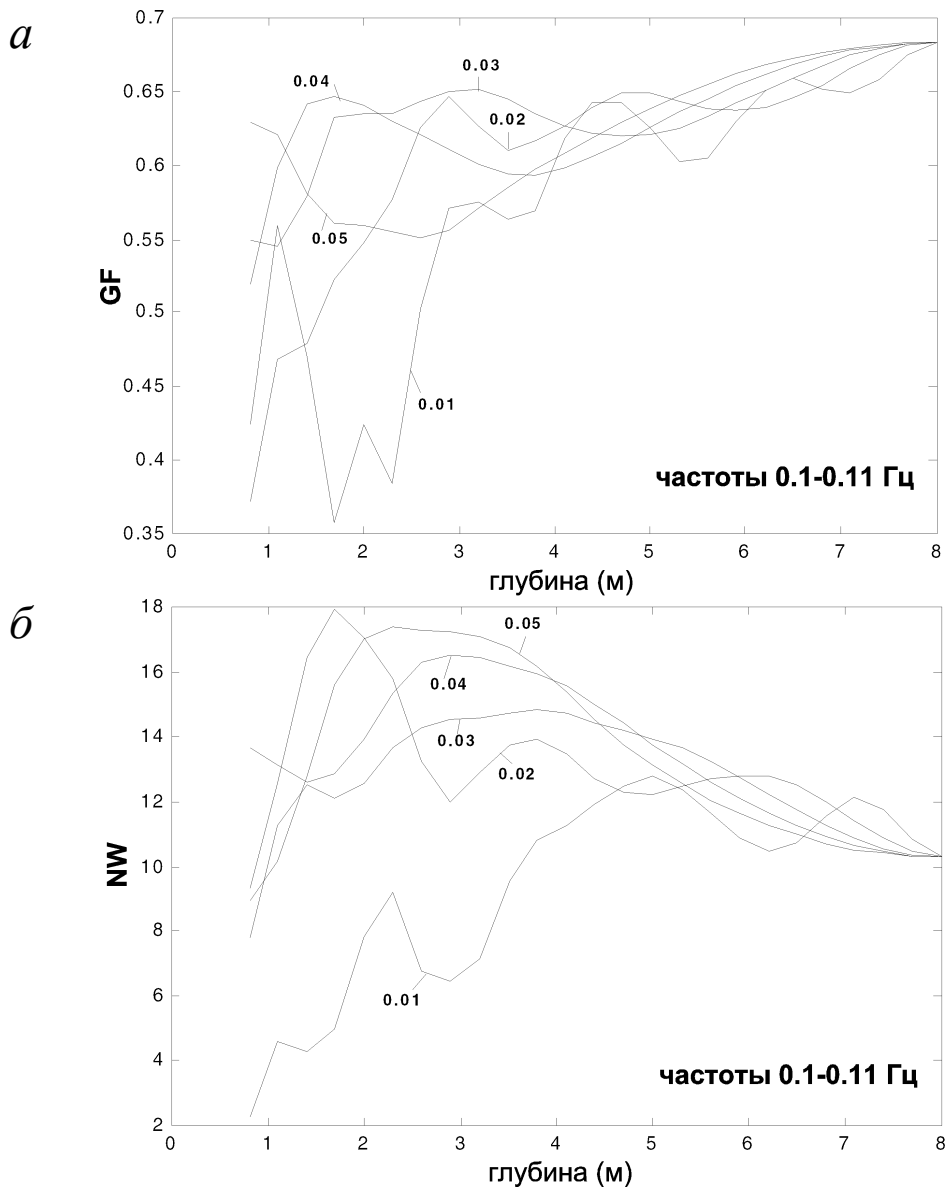


Рис. 3.20. Изменение фактора групповости (GF) – (а) и среднего числа волн в группе (NW) – (б) изначально бихроматических волн (частоты 0,1 и 0,11 Гц, начальные амплитуды равны 0,5 м) в зависимости от уклона дна. Обрушение при моделировании начинается на глубине 4 метра

уже в меньшей степени и слабо выражен для еще больших уклонов. Это также оказывает влияние на различия в поведении GF и NW над дном с разными уклонами.

Влияние высоты волны Для оценки влияния высоты волны на процесс трансформации было промоделировано пять режимов изначально бихроматических волн с началь-

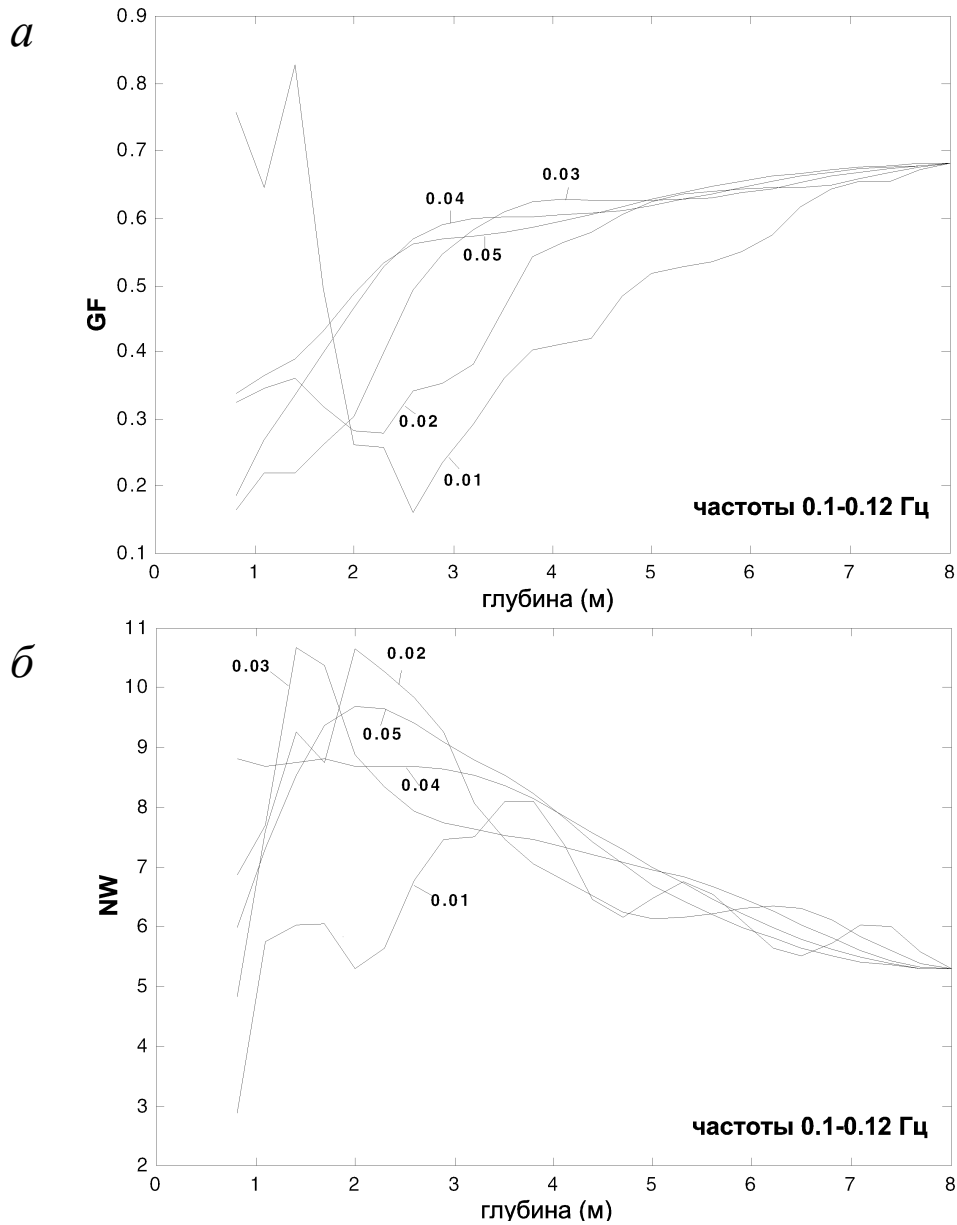


Рис. 3.21. Изменение фактора групповости (GF) – (а) и среднего числа волн в группе (NW) – (б) изначально бихроматических волн (частоты 0,1 и 0,12 Гц, начальные амплитуды равны 0,5 м) в зависимости от уклона дна. Обрушение при моделировании начинается на глубине 4 метра

ными частотами гармоник 0,1 Гц и 0,11 Гц (период групп волн 100 с, 10 волн в группе) и равными начальными амплитудами. Высоты волн брались в диапазоне от 1 до 4 м. Все волны начинали распространяться к берегу с глубины 8 м в 400 м от берега над ровным

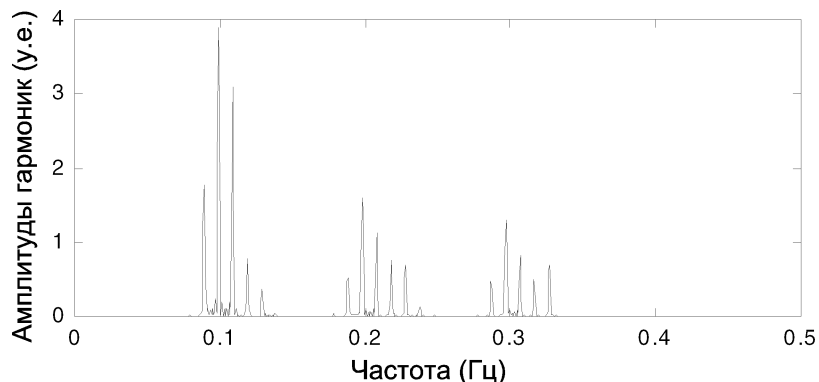


Рис. 3.22. Спектр волн с развившимися обертонами на глубине 2,3 м при уклоне дна 0,04. Изначально бихроматические волны с частотами гармоник 0,1 Гц и 0,11 Гц распространяются с глубины 8 м

дном с уклоном 0,02. Моделирование проводилось в диапазоне частот от 0 до 0,34 Гц. Параметры волн и положение точки начала обрушения волн приведены в таблице 3.14.

Таблица 3.14.

Параметры волн и положение точки начала обрушения волн

Высота максимальных волн (м)	Начальные амплитуды гармоник (м)	Точка начала обрушения (м)
1,0	0,25	115
1,6	0,40	165
2,0	0,50	200
3,0	0,75	288
4,0	1,00	373

Изменение фактора групповитости для полного частотного диапазона и для частотного диапазона первых гармоник показано на рис. 3.23. Соответствующие изменения среднего числа волн в группах приведены на рис. 3.24.

Фактор групповитости уменьшается при приближении волны к берегу и выходу ее на мелкую воду. Уменьшение начинается раньше для более высоких волн. Фактор групповитости повышается после начала обрушения, и это повышение тем больше, чем меньше начальная высота волны. Эти утверждения справедливы как для полного частотного диапазона, так и для диапазона частот первых гармоник. Фактор групповитости диапазона первых гармоник вблизи берега превышает общий фактор групповитости для всех моделируемых высот волн.

Среднее число волн в группе, рассчитанное по всему частотному диапазону, при приближении волны к берегу уменьшается. Для волн с высотами от 1 до 2 м отмечено повышение числа волн в группе в процессе трансформации волны и выходе ее на мелкую воду. Для более высоких волн (3-4 м) такого повышения не происходит. Среднее число волн в группе первых гармоник ведет себя одинаково почти для всех высот волн, за исключением $H=1$ м, где его повышение наблюдается ближе к берегу, чем для других высот волн. Различия в поведении GF и NW для различных частотных диапазонов вызваны эффектом заполнения промежутков между группами больших волн высокочастотными волнами.

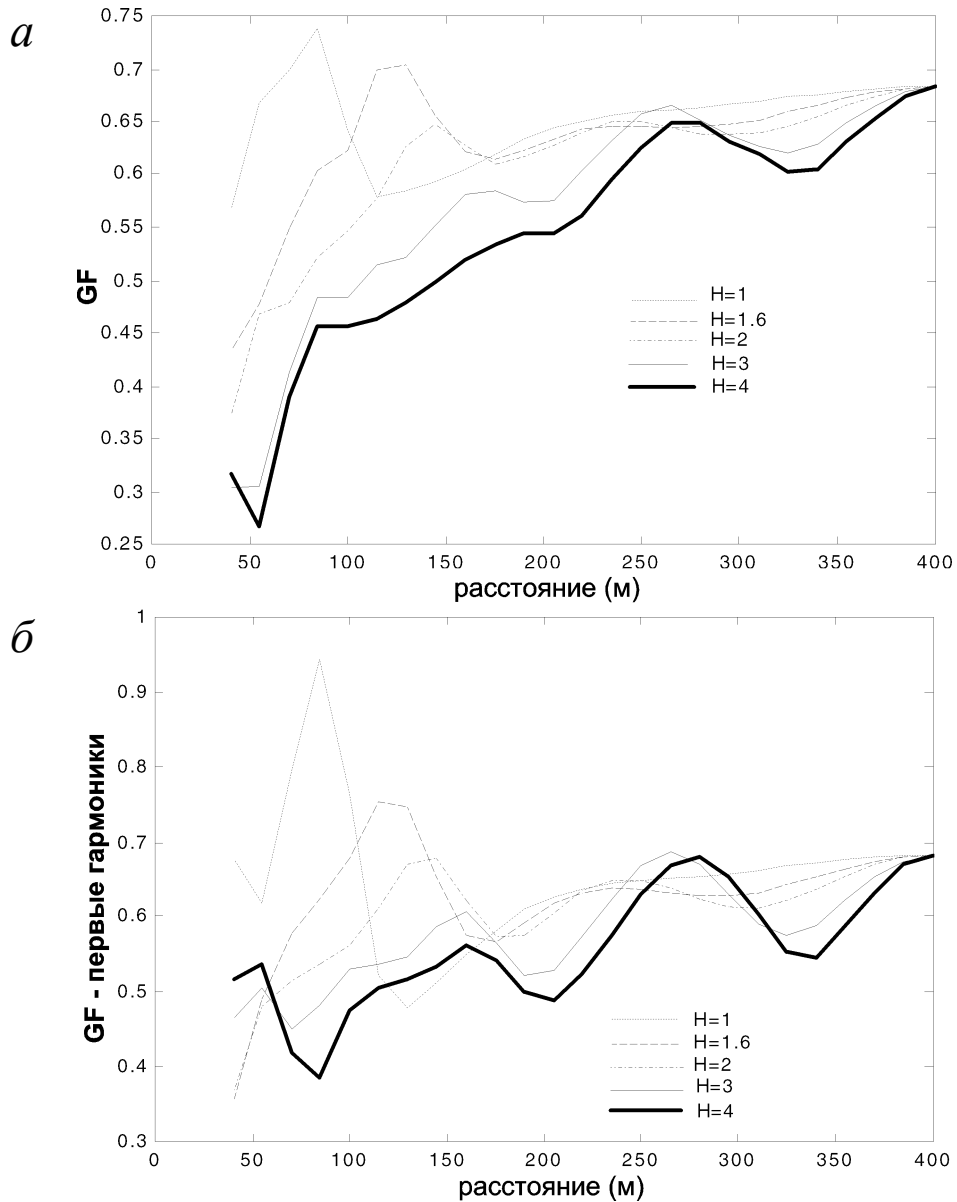


Рис. 3.23. Изменение фактора групповости изначально бихроматических волн (начальные частоты 0,1 и 0,11 Гц) с равными амплитудами для разных начальных высот волн (H). Начальная глубина 8 м, постоянный уклон дна 0,02. а) – весь частотный диапазон (0,06 – 0,34 Гц); б) – частотный диапазон первых гармоник (0,06 – 0,16 Гц)

Влияние “несущей” частоты волн Для оценки влияния несущей частоты волн на процесс трансформации было промоделировано семь режимов изначально бихроматических волн. Во всех режимах амплитуды начальных гармоник были равными 0,5 метра. Первые три режима были составлены из гармоник с частотами 0,08 и 0,09 Гц, 0,1 и

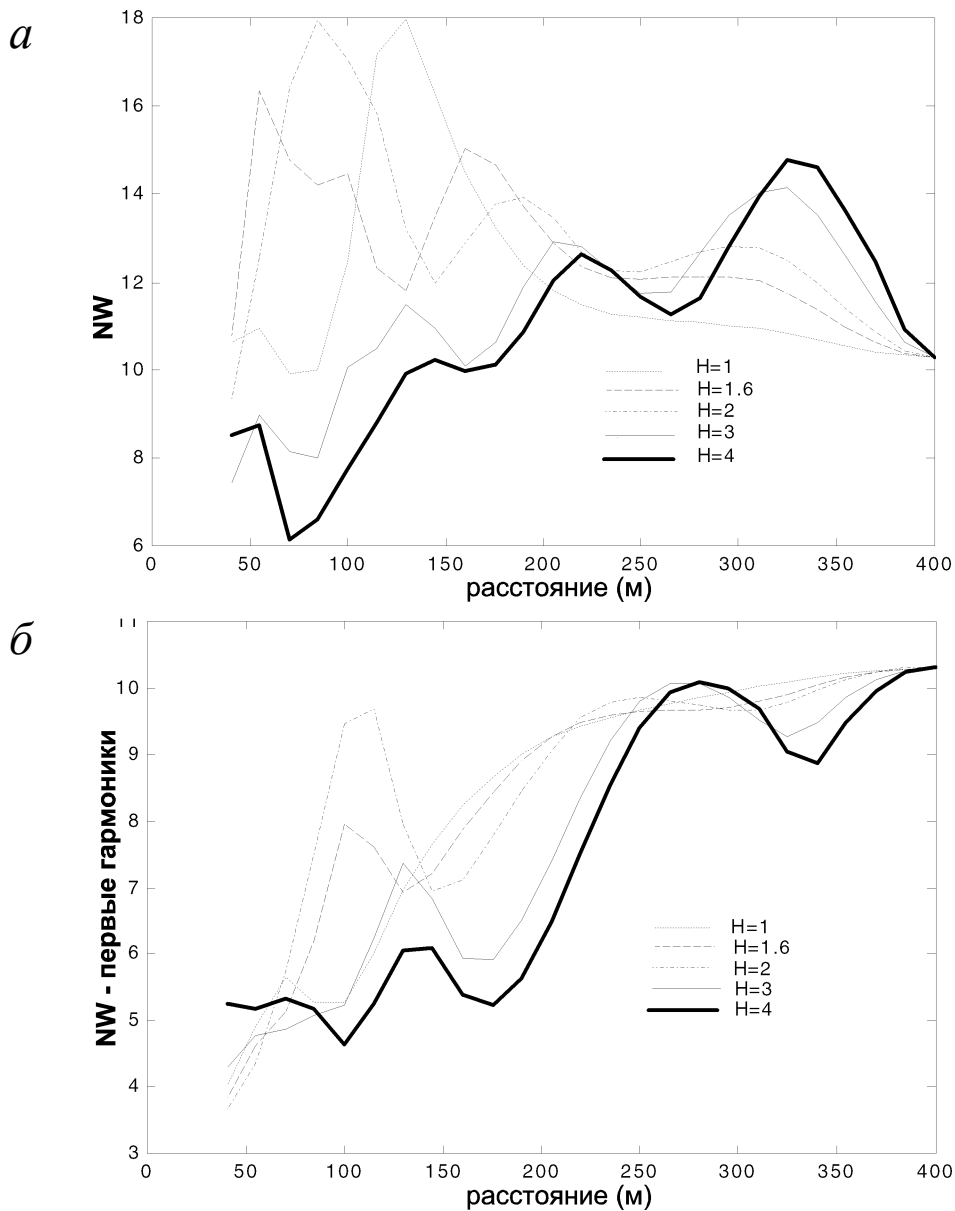


Рис. 3.24. Изменение числа волн в группе изначально бихроматических волн (начальные частоты 0,1 и 0,11 Гц) с равными амплитудами для разных начальных высот волн (H). Начальная глубина 8 м, постоянный уклон дна 0,02. а) – весь частотный диапазон (0,06 – 0,34 Гц); б) – частотный диапазон первых гармоник (0,06 – 0,16 Гц)

0,11 Гц, 0,12 и 0,13 Гц (период групп волн 100 секунд). Следующие два режима содержали начальные частоты 0,08 и 0,1 Гц, 0,1 и 0,12 Гц (период групп волн 50 секунд). И последние два режима содержали начальные частоты 0,08 и 0,11 Гц, 0,1 и 0,13 Гц (период групп волн 33 секунды). Волны распространялись к берегу с глубины 8 м над прямоли-

нейным ровным дном с уклоном 0,02. Моделирование проводилось в диапазоне частот от 0 до 0,34 Гц. Обрушение во всех случаях наступало примерно в 200 м от берега (4 м глубины).

Изменения фактора групповитости, рассчитанного по полному частотному диапазону и по диапазону частот первых гармоник, в зависимости от несущей частоты волн по мере приближения волн к берегу показаны на рис. 3.25. Из этого рисунка видно, что с

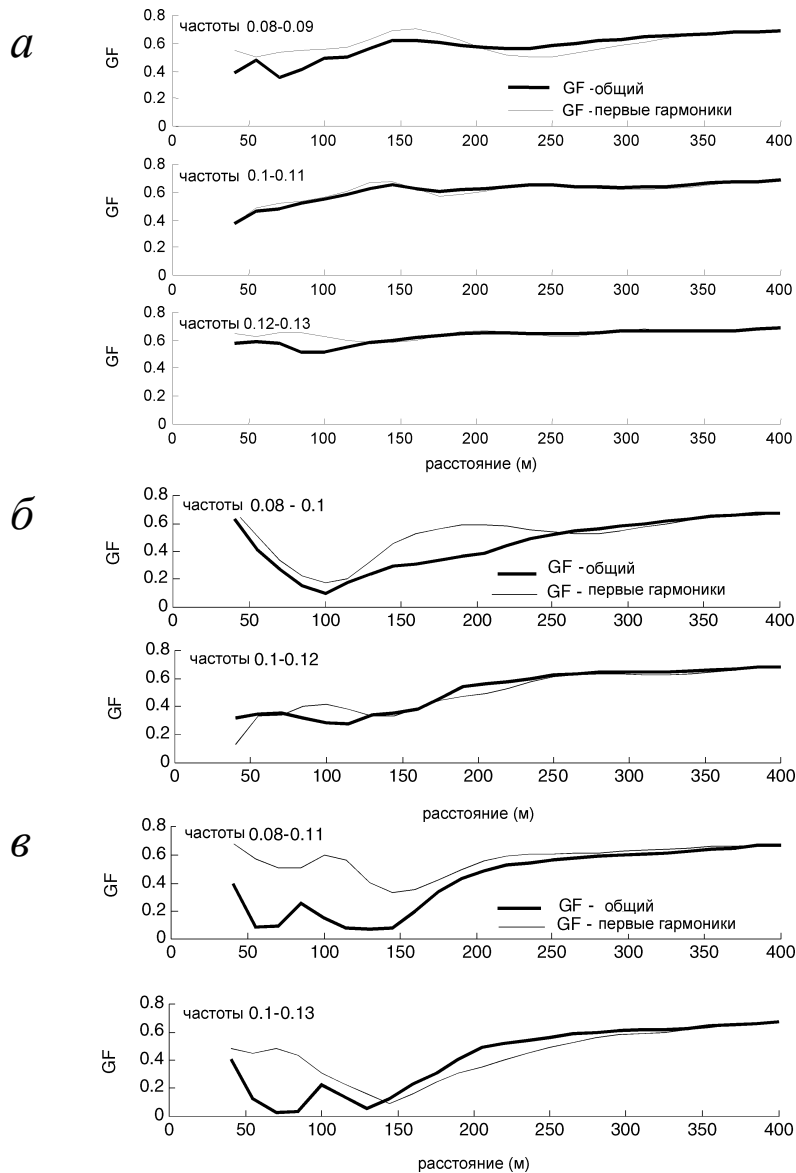


Рис. 3.25. Изменения по мере распространения волн фактора групповитости рассчитанного по полному частотному диапазону и по диапазону частот первых гармоник изначально бихроматических волн в зависимости от несущей частоты волн. а) период групп волн – 100 секунд; б) – 50 секунд; в) – 33 секунды. Цифрами на рисунках показаны частоты начальных гармоник

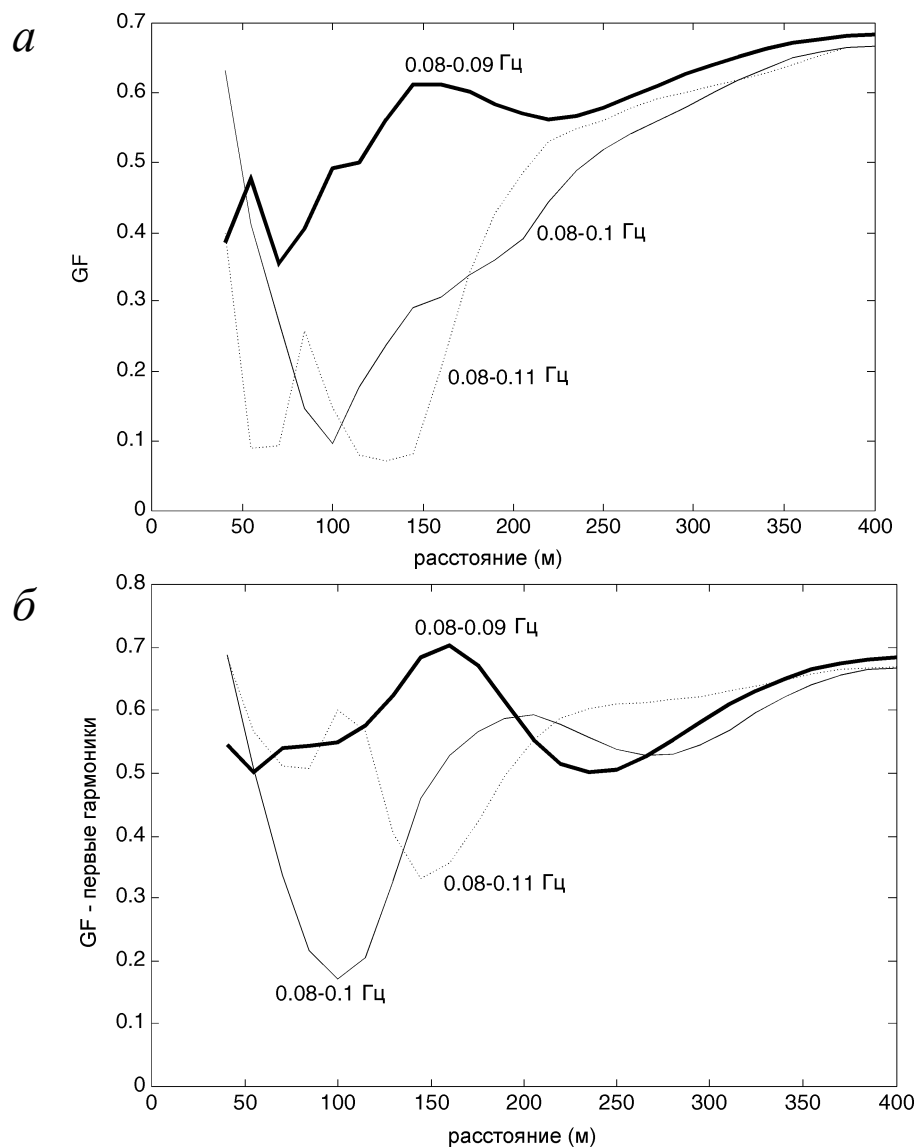


Рис. 3.26. Изменение фактора групповитости изначально бихроматических волн с гармониками амплитуд равными 0,5 м и частотами, указанными цифрами на рисунке, для разных начальных периодов групп волн. Начальная глубина 8 м, постоянный уклон дна 0,02. а) – весь частотный диапазон (0,06 – 0,34 Гц); б) – частотный диапазон первых гармоник (0,06 – 0,16 Гц)

ростом несущей частоты изменения фактора групповитости уменьшаются, т.е. длинные волны сильнее подвержены процессам нелинейных деформаций. При изменении несущей частоты от 0,085 Гц до 0,125 Гц диапазон изменения фактора групповитости изменяется в два раза (см. рис. 3.25а). Наблюдаемые изменения фактора групповитости за счет изменения несущей частоты заметно меньше, чем за счет изменения периода групп волн,