

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ МОРСКИХ СУДОВ

© 2008 г. Д. В. Гужавина, Э. П. Гулин

Акустический институт им. Н.Н. Андреева

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 14.11.07 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования флуктуаций амплитуды эхосигналов от морских судов и их кильватерных струй при вертикальном и горизонтальном облучении в широком диапазоне высоких звуковых и ультразвуковых частот. Анализируются зависимости коэффициентов вариации амплитуды эхосигналов от скорости движения морских судов, частоты излучения, длительности зондирующих импульсов и высоты волн на поверхности моря. Обсуждаются вероятностные характеристики эхосигналов от корпуса морских судов и от их кильватерных следов на разных глубинах.

PACS: 43.30.Vh, 43.30.Gv, 43.30.Ft

При отражении акустических сигналов диапазона высоких звуковых и ультразвуковых частот от движущихся морских судов наблюдаются достаточно интенсивные быстрые флуктуации амплитуды эхосигналов. Эти флуктуации оказывают существенное влияние на работу гидролокаторов, снижая их помехоустойчивость и затрудняя обнаружение морских объектов. Закономерности поведения статистических характеристик флуктуаций эхосигналов в значительной мере определяют выбор эффективных алгоритмов обнаружения, распознавания и оценки координат морских объектов в режиме активной гидролокации. Несмотря на важную роль флуктуаций эхосигналов при осуществлении подводного наблюдения, вопросы, связанные с исследованием статистических характеристик эхосигналов от морских судов (МС), в литературе практически не обсуждались. Имеющиеся данные об эхосигналах от МС [1–6] свидетельствуют о значительных флуктуациях силы цели надводных кораблей и их кильватерных струй в диапазоне ультразвуковых частот (20–30 кГц). Согласно данным, приведенным в [1, 2], изменения амплитуды в последовательности эхосигналов достигали 20–25 дБ, а в среднем составляли около 10 дБ. Однако основное внимание в этих работах было уделено исследованию зависимостей усредненных значений амплитуды эхосигналов и силы цели надводных кораблей от типа судна, курсового угла и скорости его движения, длительности излучаемых импульсов. Учет флуктуаций эхосигналов при разработке и оценке эффективности алгоритмов обработки информации в системах активной гидролокации производится обычно на основе

использования различных феноменологических вероятностных моделей эхосигналов [7, 8], которые не всегда адекватны реальным условиям.

Флуктуации эхосигналов от МС могут быть обусловлены многими причинами. При небольших скоростях движения МС и при их дрейфе флуктуации могут быть вызваны изменениями условий интерференции сигналов, отраженных от отдельных элементов корпуса движущегося судна, подверженного, кроме того, бортовой и килевой качке. При достаточно больших скоростях движения МС существенное влияние на флуктуации эхосигналов оказывает рассеяние пограничным слоем воздушных пузырьков и кильватерной струей. К флуктуациям эхосигналов приводят также интерференционные изменения уровня поля, связанные с перемещениями отражающего объекта в многолучевом канале, при наложении принимаемых сигналов, приходящих по разным лучам, рассеяние на взволнованной морской поверхности и на неоднородностях скорости звука при прямом и обратном распространении сигналов (от источника до МС и от МС до приемника). Вклад каждого из перечисленных факторов зависит от акустико-океанологических условий (состояния морской поверхности, типа волнения, особенностей рефракции звука, глубины моря и наклона дна в районе наблюдений, неоднородностей морской среды и дна), скорости движения морского судна, а также от условий излучения и наблюдения (частоты заполнения и длительности зондирующих импульсных сигналов, угловой ширины и ориентации основных лепестков характеристик направленности передающей и приемной антенн, уровня их боковых лепестков, расстояния

от лоцируемого судна до излучателя и приемной антенны при бистатической гидролокации или до приемно-излучающей антенны при моностатической гидролокации, глубины погружения излучателя и приемника). Целью настоящей работы является обсуждение результатов экспериментального исследования статистических характеристик эхосигналов от морских судов и их кильватерных струй в условиях ближней гидролокации, выявление доминирующих механизмов возникновения наблюдаемых флуктуаций при различных условиях подводного наблюдения в широком диапазоне частот (7–80 кГц).

Экспериментальные исследования проводились в прибрежном районе Черного моря при вертикальном (в днище) и горизонтальном (в борт) облучении морских судов периодическими последовательностями коротких тонально-импульсных сигналов. В экспериментах с вертикальным облучением приемно-излучающая система, состоявшая из набора магнотриксционных преобразователей с резонансными частотами 15, 30 и 80 кГц, размещалась на глубинах $h = 30$ и 60 м. Преобразователи с ориентированными вертикально вверх осями характеристик направленности имели эффективную ширину главных лепестков (по уровню 0.7) 25° , 20° и 12° соответственно на частотах 15, 30 и 80 кГц. В этом интервале частот эффективные размеры озвученной области на поверхности моря, обусловленные направленностью излучения, изменялись в пределах примерно от 6.5 м до 13 м при $h = 30$ м и от 13 м до 26 м при $h = 60$ м. Во время экспериментов они несколько превышали ширину лоцируемых судов или, по крайней мере, были сравнимы с ней, но, в то же время, всегда были меньше их длины. В ходе экспериментов излучались последовательно импульсных сигналов прямоугольной формы длительностью 0.5, 1 и 2 мс с периодом повторения 0.1 с. Проводилась регистрация сигналов, отраженных от днища проходившего над приемно-излучающей системой судна и от морской поверхности, а после прохода судна – от оставленного им кильватерного следа (слоя воздушных пузырьков) и от поверхности моря. При выбранных длительностях импульсов удалось надежно разделить по времени прихода сигналы, отраженные от корпуса судна и от морской поверхности, и исключить влияние рассеивающей поверхности моря на формирование эхосигналов от судна. Отраженные от днища судна сигналы в большинстве случаев были близки по форме и длительности к излученным сигналам. Иногда при длительности импульсов 0.5 мс наблюдались раздвоенные эхосигналы. В этих случаях размеры области, вырезаемой импульсом на отражающей поверхности, были заметно меньше эффективных размеров озвученной на поверхности моря области. При достаточно большой скорости движения судна

(более 15 уз) такое раздвоение может быть вызвано появлением пограничного слоя воздушных пузырьков, образующегося около корпуса судна.

В ходе экспериментов проводилась регистрация эхосигналов при пересечении судном озвученной области водной поверхности. Полученные зависимости амплитуды эхосигналов от времени прохода судна над акустической системой (так называемые “кривые прохода”) носят нестационарный характер. Быстрые глубокие флуктуации амплитуды наблюдаются на фоне медленно изменяющегося среднего уровня, нарастающего со временем по мере вхождения носовой части лоцируемого судна в озвученную область и убывающего по мере выхода из нее кормовой части судна. Для обработки выбирался стационарный участок кривых прохода. Протяженность этого участка зависит от скорости движения судна и его продольного размера. В случае небольших скоростей движения МС при выбранной частоте следования зондирующих импульсов 10 Гц на обрабатываемых стационарных участках укладывалось от 80 до 200 эхосигналов. Специально принятые меры, направленные на увеличение точности прохода судна над акустической системой, позволили использовать при обработке несколько галсов МС с одними и теми же параметрами движения. При больших скоростях движения МС обработка проводилась по нескольким однотипным галсам, на которых средние значения амплитуд эхосигналов отличались не более, чем на 5%.

Интенсивность флуктуаций эхосигналов характеризовалась коэффициентом вариации амплитуды $\eta = [(\overline{A^2}/\bar{A}^2) - 1]^{1/2}$, где через $\overline{A^2}$ и \bar{A}^2 обозначены соответственно средний квадрат амплитуды и квадрат средней амплитуды в последовательности принимаемых эхосигналов. В экспериментах были задействованы МС различных типов. При проведении статистической обработки данных не ставилась задача исследовать зависимость флуктуаций эхосигналов от типа лоцируемых судов. Тем не менее отметим, что по результатам проведенных экспериментов в пределах наблюдавшегося разброса значений коэффициента вариации амплитуды (КВА) такая зависимость практически отсутствует. Основное внимание было уделено исследованию зависимости КВА от скорости движения МС и частоты излучения. Значения КВА эхосигналов на разных частотах при различной скорости движения МС приведены на рис. 1. Вертикальные отрезки на графиках характеризуют точность определения значений КВА. Их длина соответствует доверительному интервалу, в который с 95%-й вероятностью попадают значения КВА в предположении нормального закона распределения ошибок измерения. Из графиков на рис. 1 и из приведенной ниже таблицы следует, что КВА отраженных от днища

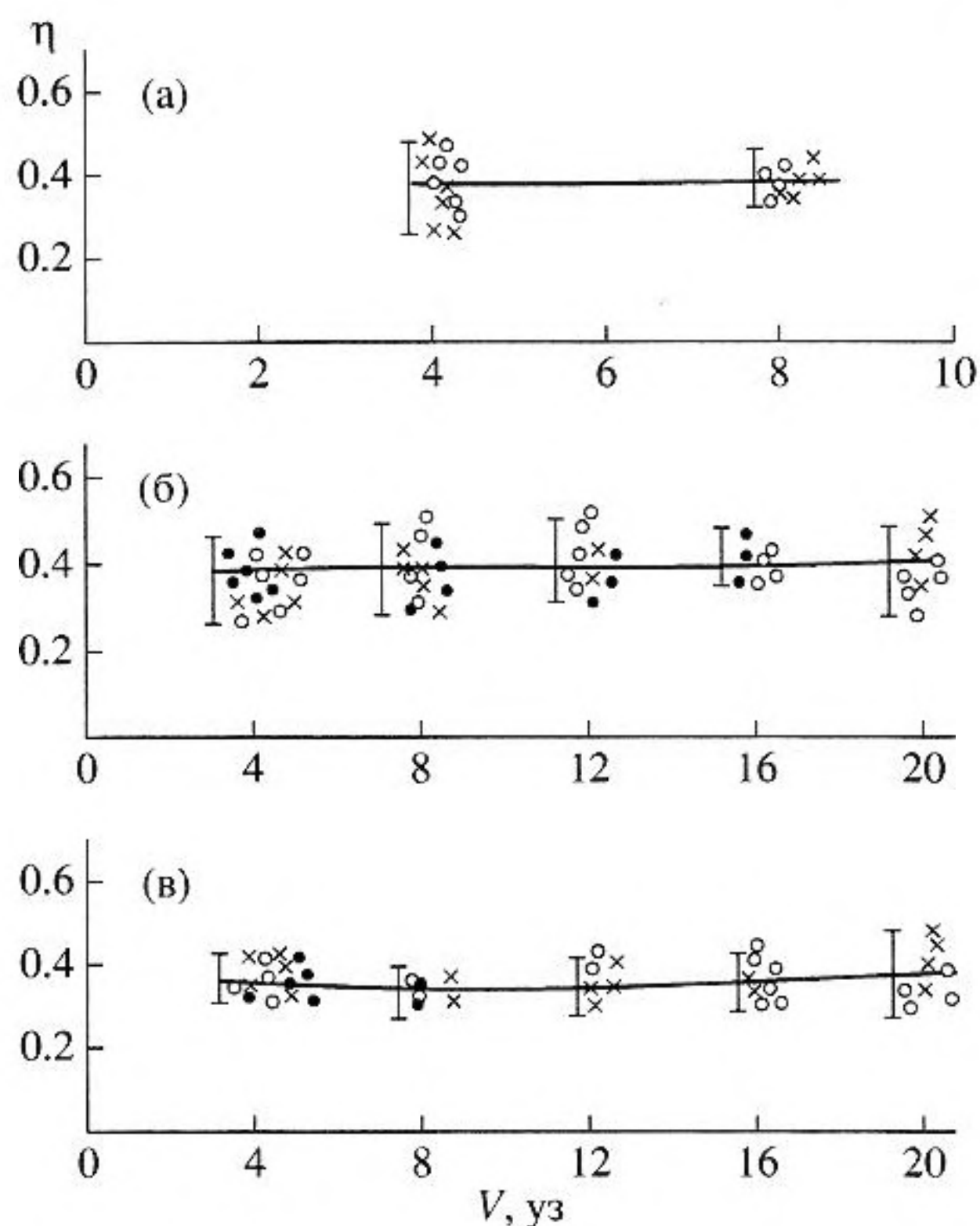


Рис. 1. Зависимости коэффициента вариации амплитуды эхосигналов η от скорости движения лоцируемых морских судов V при их вертикальном облучении (в днище) на различных частотах f импульсами разной длительности T_0 : $f = 15$ кГц (а), 30 кГц (б), 80 кГц (в); $T_0 = 0.5$ мс (○), 1 мс (×), 2 мс (●).

МС сигналов в пределах точности измерений практически не зависят от скорости движения МС и частоты излучения во всем исследованном диапазоне скоростей (4–20 уз) и частот (15–80 кГц).

Это позволяет сделать заключение, что пограничный слой воздушных пузырьков, образующийся около корпуса движущегося судна, не оказывает существенного влияния на формирование эхосигналов при вертикальном облучении МС даже при достаточно больших скоростях движения (до 20 уз) на частотах до 80 кГц. Слабое влияние пограничного слоя все же проявляется в некотором возрастании КВА при увеличении длительности импульсов с 0.5 мс до 1 мс на частотах

Средние значения коэффициентов вариации амплитуды эхосигналов η на частотах 15, 30 и 80 кГц при разных скоростях движения судов V

V , уз	4	8	12	16	20
$\eta(15)$	0.375	0.39	0.395	–	–
$\eta(30)$	0.395	0.41	0.385	0.40	0.40
$\eta(80)$	0.39	0.38	0.395	0.37	0.39

30 кГц и 80 кГц для наибольшей в экспериментах скорости движения МС (20 уз).

Применительно к задачам обнаружения МС и формирования статистического описания классификационных признаков для распознавания МС различных типов по уровню эхосигналов (по величине радиуса эквивалентной сферы отражающего объекта) представляют интерес функции распределения (плотности вероятности) амплитуды эхосигналов. Исследования показали, что из 300 функций распределения, полученных на разных частотах для эхосигналов от МС различного типа при различных скоростях их движения, до 80% распределений описываются законом Райса (обобщенным рэлеевским законом). Из них около 20% можно считать гауссовыми, а 5% – рэлеевскими. Из остальных 20% распределений примерно половина имеет две вершины, а другая половина несколько искажена относительно закона Райса. Отметим, что заключение о совпадении или расхождении экспериментальных и теоретических распределений принималось на основании критерия Пирсона с 5%-м уровнем значимости. По всей совокупности полученных значений КВА, изменявшихся в пределах от 0.25 до 0.52, была построена функция распределения КВА. Она оказалась близкой к гауссовой со средним значением 0.4 и среднеквадратичным отклонением 0.09.

Достаточно высокая частота повторения импульсов позволила провести временную корреляционную обработку флуктуаций амплитуды эхосигналов. На рис. 2 приведены нормированные функции временной автокорреляции флуктуаций амплитуды эхосигналов от МС для трех частот излучения – 15, 30 и 80 кГц – и различных скоростей движения МС. Приведенные корреляционные функции являются двухмасштабными. Сначала наблюдается быстрый спад корреляционных функций примерно до уровня 0.5, а затем этот спад замедляется. Интервалы корреляции, характеризующие быстрый и медленный спад корреляционных кривых, уменьшаются обратно-пропорционально частоте излучения звука и скорости движения МС. На частоте 15 кГц при скорости буз они составляют приблизительно 0.08 с и 1 с.

Ввиду отсутствия явной частотной зависимости интенсивности флуктуаций эхосигналов в широком диапазоне частот и отклонения наблюдаемых распределений амплитуды от рэлеевского закона полученные результаты не удается объяснить в рамках модели движущегося отражающего экрана с нормально распределенными неровностями или неоднородностями. Более подходящей для описания характеристик наблюдаемых флуктуаций эхосигналов является модель многоэлементного отражателя со случайно расположенными отражающими элементами и преобладающим влиянием одного или небольшого числа

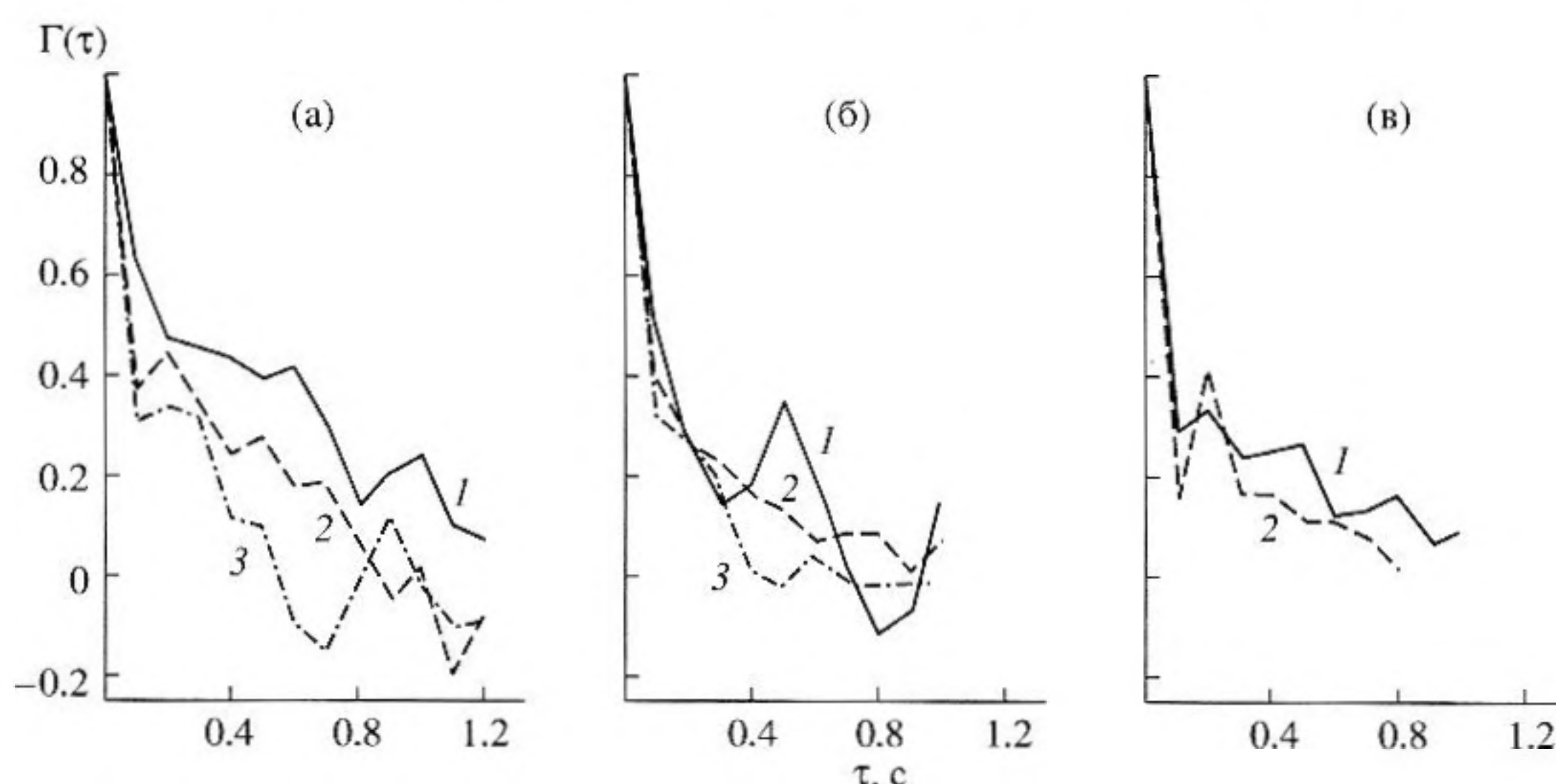


Рис. 2. Нормированные функции временной автокорреляции флуктуаций амплитуды эхосигналов $\Gamma(\tau)$ при вертикальном облучении морских судов на разных частотах для различных скоростей их движения: $f = 15$ кГц (а), 30 кГц (б), 80 кГц (в); $V = 4$ уз (1), 8 уз (2), 12 уз (3); $T_0 = 1$ мс.

отражающих элементов. В радиолокации подобная модель известна как модель локальных источников, которая является феноменологической моделью процесса рассеяния волн от объектов сложной формы [9]. Отражающими элементами при вертикальном облучении МС могут быть зеркально отражающие участки днища МС, представляющего собой тонкую упругую неоднородную оболочку, а также шпангоуты и стрингеры, предназначенные для повышения жесткости и прочности корпуса МС. Флуктуации эхосигналов обусловлены изменениями условий интерференции сигналов, отраженных разными участками днища судна, при его движении и качке. В соответствии с наблюдаемыми зависимостями масштабов временной корреляции флуктуаций эхосигналов от скорости движения МС и частоты разность расстояний от приемно-излучающей системы до основных отражающих элементов превышает длину звуковой волны во всем диапазоне частот (15–80 кГц).

В экспериментах с горизонтальным облучением МС использовалась стационарная акустическая система, расположенная на склоне дна на глубине 4 м. Исследования проводились в диапазоне частот 7–36 кГц при длительностях излучаемых сигналов 1–10 мс и эффективной ширине характеристики направленности (ХН) приемно-излучающих систем около 10° по уровню 0.7 в обеих плоскостях. Лоцируемое судно на заданном расстоянии (200–500 м) заданным курсом проходило перед акустической системой. Горизонтальные размеры озвученной области на таких расстояниях были сравнимы с протяженностью МС или превышали ее. В случае горизонтального облучения только при малых и средних скоростях

движения и бортовых аспектах эхолокации МС (прохождение судов перпендикулярно оси ХН) эхосигналы близки по форме и длительности к излученным сигналам. При косых (не бортовых) углах облучения и больших скоростях движения МС эхосигналы становятся многоблочными, а их длительность увеличивается. При малых скоростях это происходит из-за отражения от корпуса судна по всей его длине, а при больших скоростях, кроме того, – из-за рассеяния пограничным слоем. В случае бортового облучения движущихся с достаточно большими скоростями (15–20 уз) МС эхосигналы от корпуса МС и от пограничного слоя при малых длительностях импульсов (1–3 мс) разделялись по времени прихода, что позволило определить интенсивность флуктуаций для каждого из этих эхосигналов. При длительности импульсов 10 мс эхосигналы от корпуса МС и от пограничного слоя не разделялись, поэтому проводилась статистическая обработка амплитуды суммарного эхосигнала. В случае не бортовых углов облучения и многоблочной структуры эхосигналов обработка велась по максимальному значению амплитуды независимо от того, какому блоку в данный момент это значение принадлежит.

Согласно приведенным на рис. 3 данным при горизонтальном бортовом облучении МС импульсами длительностью $T_0 = 1–3$ мс на частотах $f = 7, 15$ и 36 кГц КВА эхосигналов от корпуса МС в пределах точности измерений практически не зависят от скорости движения судов, как и в случае вертикального облучения. На частотах 7 и 15 кГц слабая зависимость от скорости движения МС наблюдается и для импульсов длительностью 10 мс, что свидетельствует о незначительном влиянии пограничного слоя и при таком ракурсе

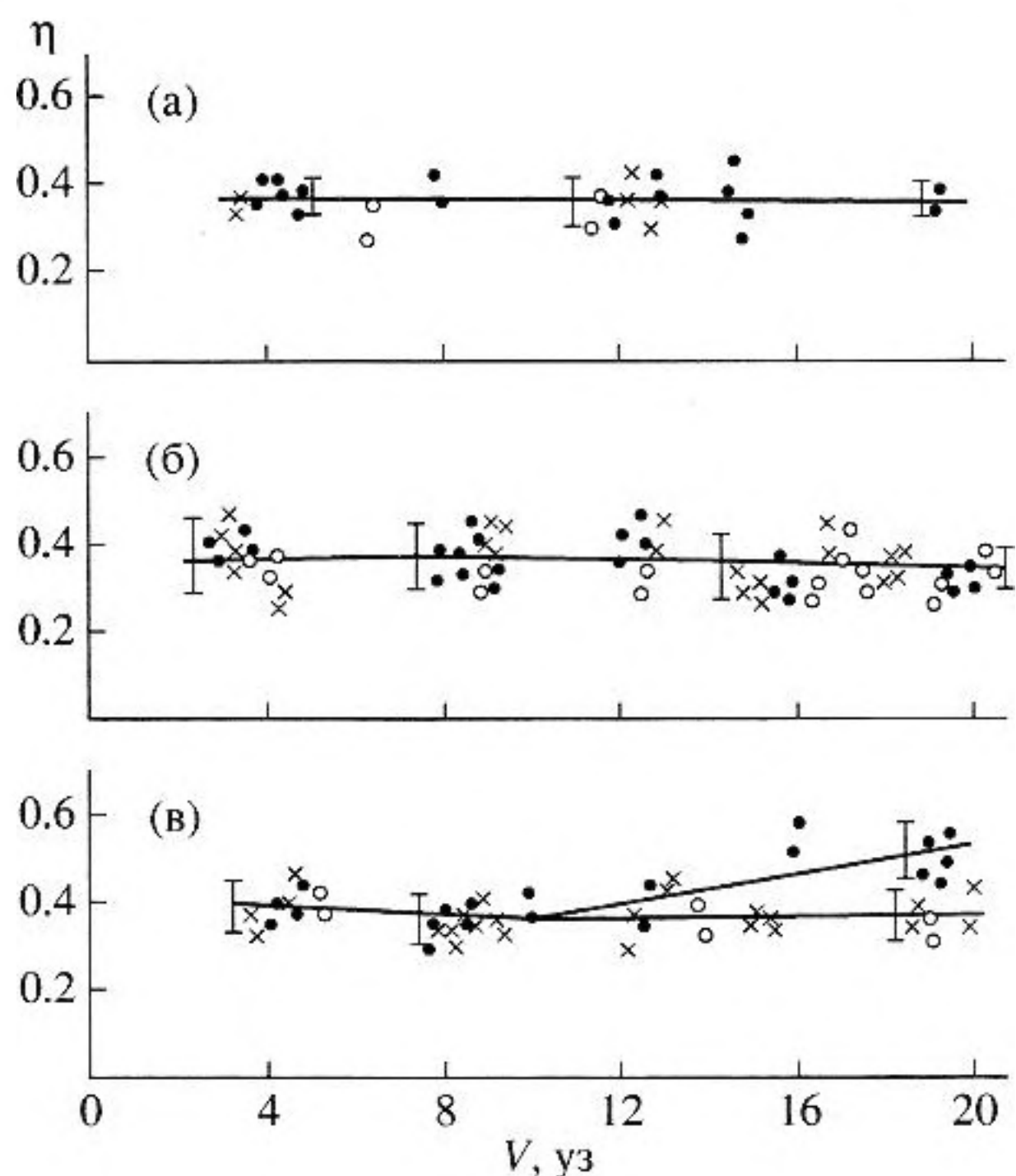


Рис. 3. Зависимости коэффициента вариации амплитуды эхосигналов от скорости движения лоцируемых морских судов при их горизонтальном бортовом облучении ($\varphi = 90^\circ$): $f = 7$ кГц (а), 15 кГц (б), 36 кГц (в); $T_0 = 1$ мс (○), 3 мс (×), 10 мс (●).

облучения МС. И только на частоте 36 кГц при длительности импульсов 10 мс КВА эхосигналов в интервале 10–20 уз заметно возрастает с увеличением скорости движения МС. Это объясняется интенсивным рассеянием звука резонансными газовыми пузырьками в пограничном слое, имеющими максимум плотности их распределения по размерам, который соответствует интервалу частот 30–50 кГц. В таких условиях КВА эхосигналов растет с увеличением длительности зондирующих сигналов. Рассеяние звука пограничным слоем сказывается и на частотной зависимости КВА эхосигналов (рис. 4). При движении МС со скоростью 20 уз для импульсов длительностью 10 мс наблюдается заметное увеличение КВА с частотой – от 0.35–0.4 на 7 кГц до 0.5–0.53 на 36 кГц. Для импульсов длительностью 3 мс КВА эхосигналов при значительном разбросе значений (от 0.25 до 0.55) слабо нарастает с частотой как при малой (6 уз), так и при большой (20 уз) скорости движения МС. Такое нарастание может быть связано с отражением и рассеянием акустических сигналов на взволнованной морской поверхности. В условиях проведенных экспериментов при горизонтальном облучении МС принимаемые сигналы приходили по 4 путям. По кратчайшему пути эхосигнал приходил без отражения от поверхности моря, следующими по времени прихода были два сигнала, имевшие один контакт с по-

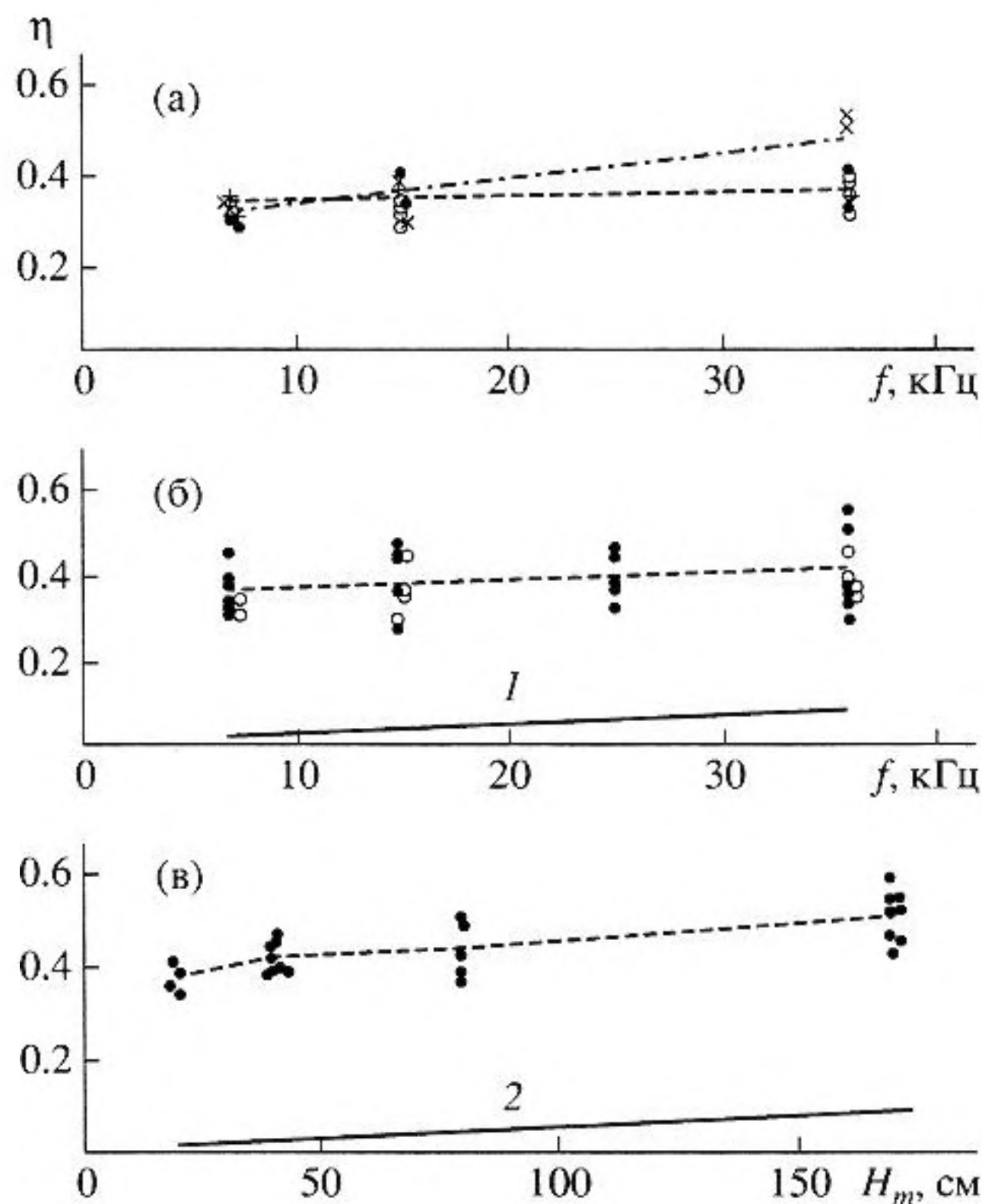


Рис. 4. Зависимости коэффициента вариации амплитуды эхосигналов от частоты излучения для двух типов морских судов (а, б) и от высоты волны на поверхности моря (в) для частоты излучения 7 кГц при горизонтальном бортовом облучении ($\varphi = 90^\circ$): $V = 6$ уз, $T_0 = 3$ мс (●); $V = 20$ уз, $T_0 = 3$ мс (○); $V = 6$ уз, $T_0 = 10$ мс (×); $V = 20$ уз, $T_0 = 10$ мс (+); сплошными линиями (1, 2) изображены зависимости $\eta(f) = 0.175 \Phi$ для условий экспериментов, результаты которых приведены на рис. 4б, 4в.

верхностью, и последний сигнал имел два контакта с поверхностью (один – до, а другой – после отражения от корпуса МС). Известно, что при скользящем падении на неровную поверхность под углом ψ для малых по сравнению с единицей значений параметра Рэля $\Phi = 4\pi(f/c)\sigma_\zeta \sin \psi$, где σ_ζ – среднеквадратичное отклонение взволнованной поверхности от среднего уровня, c – скорость звука, КВА однократно отраженного сигнала η_0 определяется приближенным выражением $\eta_0 \approx 0.35\Phi$. При двукратном отражении КВА увеличивается в $\sqrt{2}$ раз. Для суммарного эхосигнала без учета флуктуаций, обусловленных отражением от корпуса движущегося МС и рассеянием пограничным слоем, в предположении энергетического сложения сигналов, приходящих разными путями, т.е. в среднем, $\eta \approx 0.175\Phi$. Эта зависимость изображена штриховой линией на рис. 4б для наблюдавшегося во время экспериментов волнения силой 2 балла. Сопоставление ее с экспериментальными данными показывает, что вол-

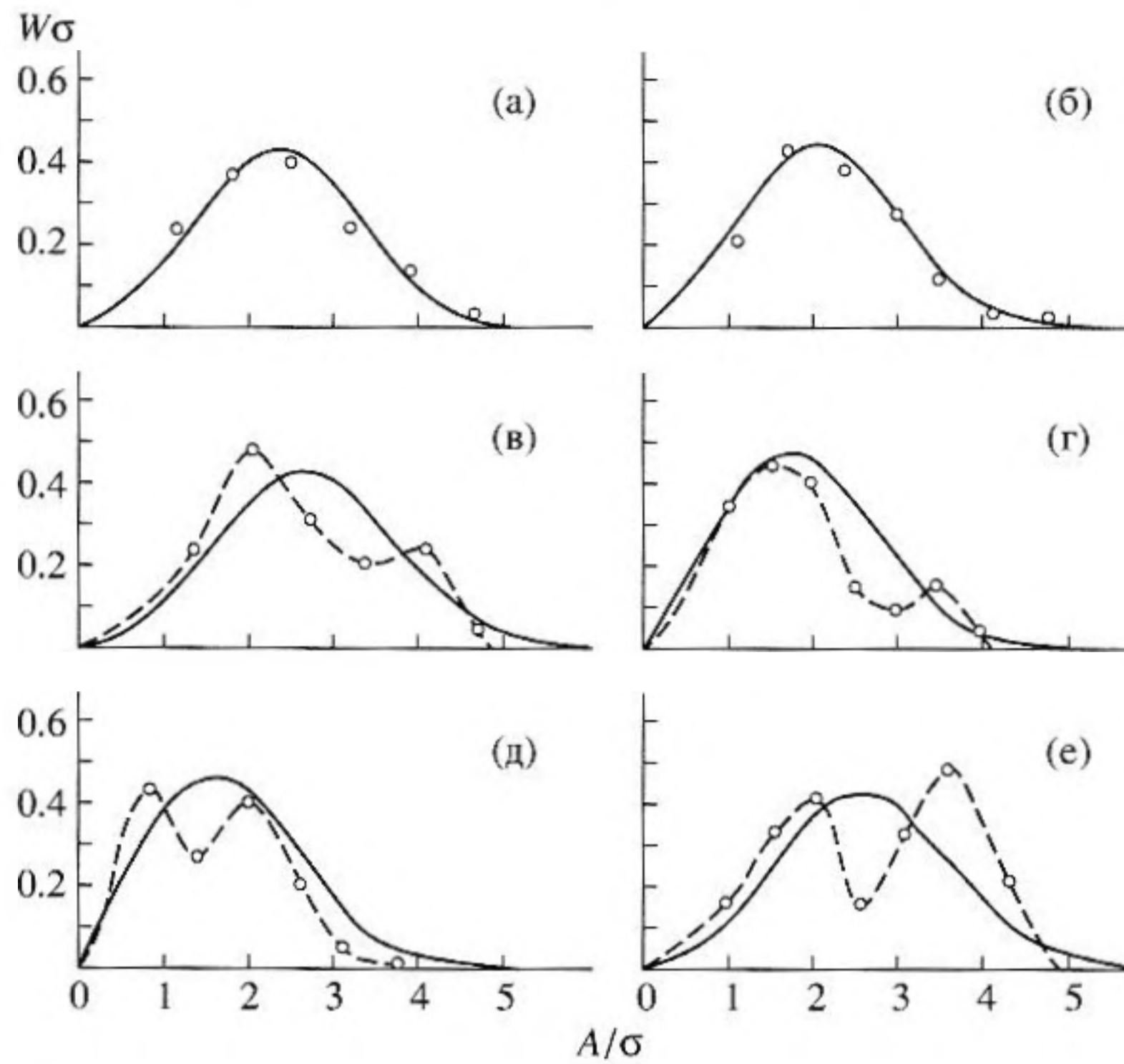


Рис. 5. Примеры функций распределения амплитуды эхосигналов W при горизонтальном бортовом облучении ($\varphi = 90^\circ$) морских судов: (а) – $f = 7$ кГц, $T_0 = 30$ мс, $V = 14$ уз, $\eta = 0.4$; (б) – $f = 36$ кГц, $T_0 = 30$ мс, $V = 10.5$ уз, $\eta = 0.42$; (в) – $f = 15$ кГц, $T_0 = 3$ мс, $V = 9$ уз, $\eta = 0.35$; (г) – $f = 7$ кГц, $T_0 = 30$ мс, $V = 11$ уз, $\eta = 0.48$; (д) – $f = 36$ кГц, $T_0 = 10$ мс, $V = 14$ уз, $\eta = 0.49$; (е) – $f = 36$ кГц, $T_0 = 3$ мс, $V = 12$ уз, $\eta = 0.38$. Сплошные кривые соответствуют обобщенным рэлеевским распределениям для полученных при обработке экспериментальных данных значений коэффициентов вариации амплитуды η и дисперсии квадратурных составляющих эхосигналов σ^2 , рассчитанной по значениям η и средним значениям амплитуды в предположении обобщенно-рэлеевского распределения амплитуды эхосигналов.

нение моря не может быть определяющим фактором, приводящим к флуктуациям эхосигналов от МС, но его влиянием можно объяснить некоторое возрастание КВА с увеличением частоты для импульсов малой длительности (3 мс). Заметное влияние рассеяния морской поверхностью на флуктуации эхосигналов от МС подтверждается результатами экспериментов при разной степени волнения – от 1 до 4 баллов (рис. 4в). Хорошо виден рост (в среднем) КВА эхосигналов на частоте 7 кГц при увеличении максимальной высоты поверхностной волны H_m (по уровню обеспеченности 3%) в 10 раз (с 18 до 180 см). Штриховой линией приведена зависимость КВА эхосигналов от высоты волны H_m без учета флуктуаций при отражении от корпуса МС и пограничного слоя.

Результаты статистической обработки экспериментальных данных при горизонтальном бортовом облучении МС свидетельствуют о большем разнообразии форм функций распределения амплитуд эхосигналов, чем в случае вертикального облучения. Чаще всего встречаются одновершинные несимметричные функции распределения. Для 65–70% от общего числа полученных 250 распределений наилучшей аппроксимацией явля-

ется закон Райса. При значениях КВА, не превышающих 0.3, наблюдается согласие с нормальным законом. Остальные 30–35% распределений, полученных преимущественно при достаточно больших скоростях движения МС, являются двухвершинными. Наиболее часто (20–25% от общего числа) встречаются распределения, у которых первый максимум больше второго. Около 5–10% составляют распределения, у которых максимумы примерно одинаковы, 3–5% приходится на долю распределений с плоской вершиной и распределений, у которых второй максимум больше первого. Примеры функций распределения разной формы приведены на рис. 5. Согласно работе [10], в которой рассмотрены статистические характеристики радиосигналов, отраженных от ионосферы, двухвершинным распределениям амплитуды соответствуют модели сигналов с двумя гармоническими составляющими разной частоты или амплитудно-модулированными колебаниями и случайной компонентой в виде пуассонова (импульсного) шума. Такая модель описывает, в частности, двухвершинные распределения с преобладающим первым максимумом и распределения с плоской вершиной. Для эхосигналов от МС подобная модель соответствует наложению сиг-

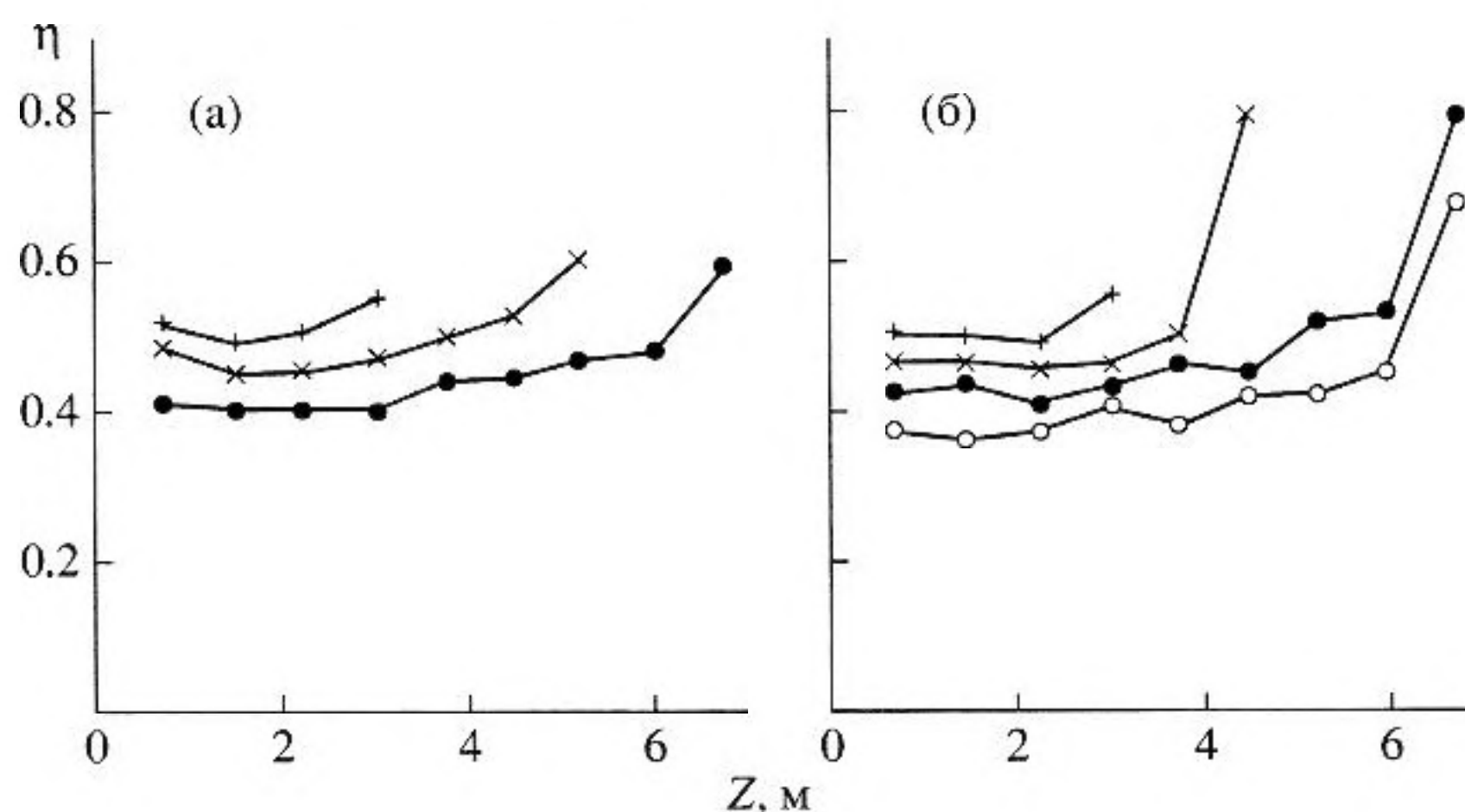


Рис. 6. Коэффициенты вариации амплитуды сигналов, рассеянных кильватерным следом морских судов при разных глубинах залегания рассеивающих слоев Z : $f = 15$ кГц (а), 30 кГц (б); $V = 4$ уз (+), 8 уз (x), 12 уз (●), 17 уз (○); $T_0 = 1$ мс.

налов, отраженных от корпуса судна и от пограничного слоя, при этом случайная компонента формируется небольшим числом элементов рассеивающей области, появление которых определяется законом малых вероятностей Пуассона. Обоснованием этой модели применительно к обсуждаемым экспериментам может служить то обстоятельство, что при достаточно больших скоростях движения МС пограничный слой состоит уже не из хаотически движущихся газовых пузырьков, а из турбулентных образований (вихрей), в которых пузырьки движутся направленно. Поскольку эти вихри достаточно крупные, число их невелико, а появление случайно, так как условия для образования развитой устойчивой турбулентности еще не создались. Сигналы, рассеянные такой областью, оказываются распределенными по закону Пуассона. В рамках такой же модели, но при большом числе случайных рассеивателей, т.е. для случайной компоненты в виде гауссова шума, описываются распределения амплитуды с преобладающим вторым максимумом. При разделении сигналов, отраженных от корпуса МС и от пограничного слоя, большая часть распределений амплитуды описывается законом Райса для эхосигналов от корпуса судна и близка к рэлеевским для эхосигналов от пограничного слоя. На зависимость КВА от угла облучения МС существенно повлияло усреднение флуктуаций амплитуды, обусловленное выбором при обработке максимального по уровню импульса в наблюдаемой многоблочной структуре эхосигнала. Это привело к уменьшению КВА с отклонением угла облучения φ от бортового аспекта ($\varphi = 90^\circ$). Так, при $f = 36$ кГц, $T_0 = 10$ мс и скорости движения МС $V = 6$ уз КВА уменьшается с 0.3–0.5 для $\varphi = 90^\circ$ до 0.2–0.3 для $\varphi = 0^\circ$ – 45° и $\varphi = 180^\circ$ (кормовой аспект). В то же время при обработке по отдельным блокам в пределах узкого временного

строга существенного различия КВА η в интервале углов облучения 0° – 180° не выявлено (при довольно большом разбросе значений η – от 0.3 до 0.55).

Обработка эхосигналов от кильватерного следа (КС), остающегося после прохода МС, проводилась как при вертикальном, так и при горизонтальном облучении. При вертикальном облучении исследовалась зависимость КВА эхосигналов от глубины проникновения КС. С помощью временного стробирования выделялись импульсные сигналы, рассеянные слоями воздушных пузырьков КС, находящимися на разных глубинах. Толщина таких слоев определяется длительностью импульсов, а их протяженность по горизонтали – эффективной шириной ХН приемно-излучающей системы. На рис. 6 приведены зависимости КВА эхосигналов от глубины залегания рассеивающих слоев КС по результатам экспериментов на двух частотах при различных значениях скорости хода МС. Для обработки данных выбирались сигналы, рассеянные головной частью КС с наибольшей концентрацией воздушных пузырьков. Значение $Z = 0$ соответствует среднему уровню поверхности моря. С удалением рассеивающих слоев КС от поверхности КВА вначале медленно увеличиваются или остаются практически неизменными, а затем, начиная с некоторой глубины, зависящей от скорости хода МС и частоты излучения, резко возрастают. Более отчетливо этот эффект выражен на частоте 30 кГц. В этом случае при $V = 8$ уз и 12 уз КВА на глубинах $Z \approx 4.5$ м и 7 м соответственно возрастают примерно до 0.8, а при $V = 17$ уз на глубине $Z \approx 7$ м – до 0.7. На частоте 15 кГц при $V = 8$ уз, $Z \approx 5.2$ м и $V = 12$ уз, $Z \approx 7$ м КВА увеличивается до 0.6. По значениям глубин, на которых происходит резкий рост КВА, можно оценивать эффективную толщину КС (приповерхностного слоя воздушных пузырьков)

на разных частотах. Для больших глубин определить КВА не удалось, поскольку эхосигналы находились на уровне помех. Увеличение КВА рассеянных сигналов с глубиной сопровождается изменением вида функций распределения амплитуды (рис. 7). На достаточно малых глубинах они удовлетворительно описываются законами Райса и Рэлея, а для глубоко лежащих слоев становятся более асимметричными, с максимумом, сдвинутым в сторону малых значений амплитуды, и КВА $\eta > 0.52$ ($\eta \approx 0.55-0.8$). Отметим, что полученные экспериментальные данные о флуктуациях эхосигналов от КС согласуются с рассмотренной в работе [11] дискретной пуассоновской моделью рассеяния (реверберации).

При обработке по максимальной амплитуде в многоблочном эхосигнале в 85% случаев из общего числа (390) экспериментальные распределения описываются законом Райса с КВА от 0.18 до 0.42. При $\eta \leq 0.3$ (примерно в 70% случаев) распределения близки к нормальным. Наблюдавшееся уменьшение КВА с увеличением скорости хода МС может быть связано с усреднением флуктуаций многоблочного эхосигнала, поскольку число блоков увеличивается с ростом скорости хода. Однако аналогичная зависимость получена и при обработке по отдельным блокам. В этом случае на малых глубинах (от 0.5 м до 2–2.5 м) КВА на частоте 30 кГц уменьшаются примерно с 0.5 при $V = 4$ уз до 0.35–0.4 при $V = 17$ уз. В рамках модели Райса по значениям КВА можно оценить уровень когерентной составляющей в эхосигналах от КС. Параметром распределения Райса является отношение интенсивностей когерентной I_c и некогерентной I_n составляющих. По результатам экспериментов коэффициент когерентности $\beta = (I_c/I_n)^{1/2}$ для эхосигналов от головной части КС на глубинах 0.5–2 м принимает значения в интервале $\beta \approx 0.8-1.5$ на частотах $f = 15$ и 30 кГц при скоростях хода МС $V = 6-17$ уз. В работе [12] приведены результаты модельных измерений когерентной и некогерентной составляющих рассеяния звука на слое воздушных пузырьков. Измерения проводились на частоте 13 кГц при различной концентрации пузырьков в слое. Значения коэффициента когерентности $\beta = 0.8-0.9$, полученные путем пересчета на концентрацию пузырьков, соответствующую экспериментам по эхолоцированию КС МС, не выходят за пределы интервала значений β для эхосигналов от КС ($\beta \approx 0.8-1.5$). Для пересчета было использовано оценочное соотношение, полученное в работе [13]: $\beta^2 \approx N_r c^3 T_0 / (8\pi f^2)$, где N_r – среднее число рассеивателей (резонансных пузырьков) в единице объема. В этой работе показано, что когерентная составляющая отлична от нуля только при наличии изменения среднего числа рассеивателей по толщине рассеивающего слоя, определяемой длительностью импульсов, и при достаточно высокой

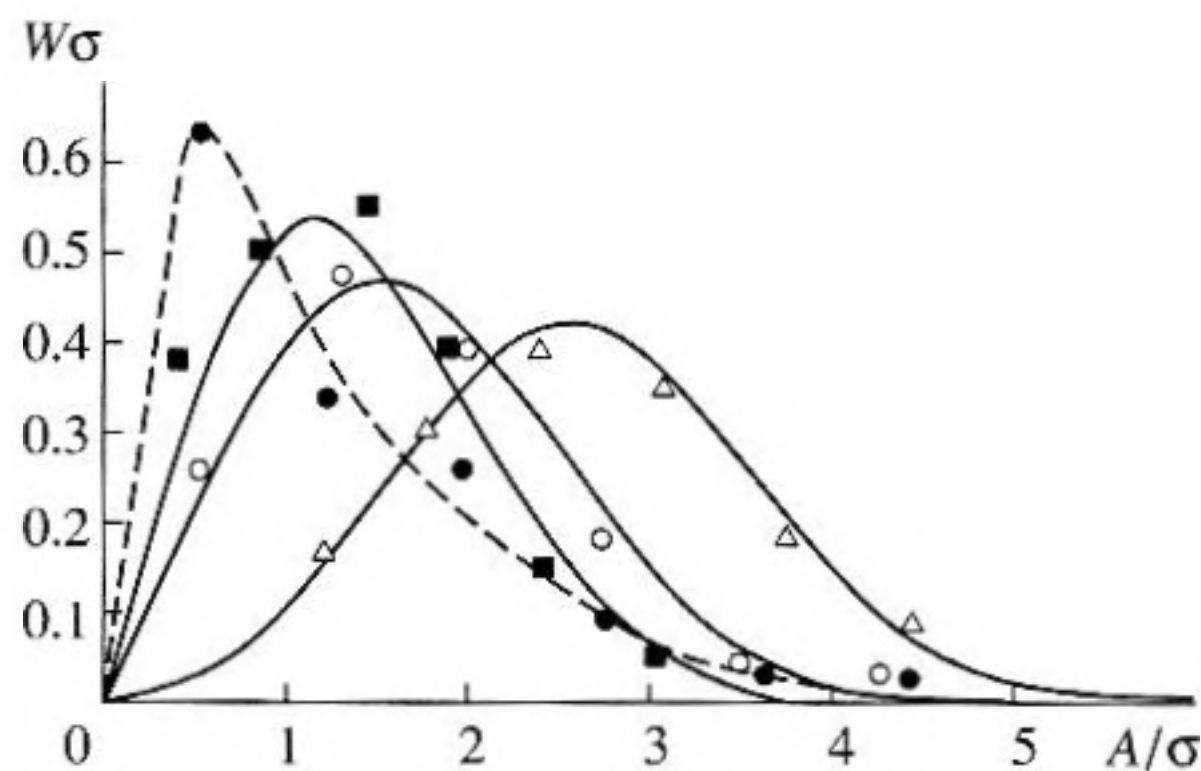


Рис. 7. Изменение с глубиной Z функций распределения амплитуды сигналов, рассеянных кильватерной струей морского судна при вертикальном облучении: $f = 30$ кГц, $V = 12$ уз, $T_0 = 1$ мс; $Z = 2$ м, $\eta = 0.37$ (Δ); $Z = 4$ м, $\eta = 0.49$ (\circ); $Z = 6$ м, $\eta = 0.52$ (\blacksquare); $Z = 8$ м, $\eta = 0.65$ (\bullet).

концентрации рассеивателей. Измерение концентрации воздушных пузырьков в КС МС проводилось способом, описанным в работе [14]. Поскольку рассеяние кильватерным следом МС обусловлено в основном резонансными воздушными пузырьками, на частотные зависимости КВА и коэффициента когерентности существенно влияет распределение пузырьков по размерам на разных глубинах. Согласно имеющимся данным, максимум плотности этого распределения приходится на пузырьки диаметром 0.15–0.2 мм, что соответствует резонансным частотам 30–40 кГц. По результатам экспериментов частотные зависимости $\eta(f)$ и $\beta(f)$ в диапазоне $f = 15-80$ кГц слабо выражены. Некоторое уменьшение η и увеличение β наблюдается на частоте 30 кГц, что, с учетом зависимости $N_r(f)$, согласуется с приведенной выше формулой для β^2 . Продолжительное наблюдение за эхосигналами от КС на малых глубинах показало, что КВА и средние амплитуды на частотах 15 и 30 кГц в течение 2–3 мин после прохода МС остаются практически неизменными, а затем, по аналогии с зависимостью от глубины, КВА начинают возрастать, при этом рассеянные на КС сигналы постепенно теряют когерентность.

Аналогичные результаты получены при горизонтальном облучении КС. При обработке эхосигналов основное внимание уделялось исследованию флуктуаций амплитуды для начальных участков КС, отстоящих от кормы МС на расстоянии 50–200 м. Как и при вертикальном облучении, эхосигналы от КС имеют многоблочную структуру. С помощью временного строга выбирались блоки импульсов с наибольшим средним значением амплитуды рассеянных сигналов. Согласно приведенным на рис. 8 данным, на частоте 7 кГц КВА в среднем мало меняется с изменением скорости хода МС, и даже при достаточно боль-

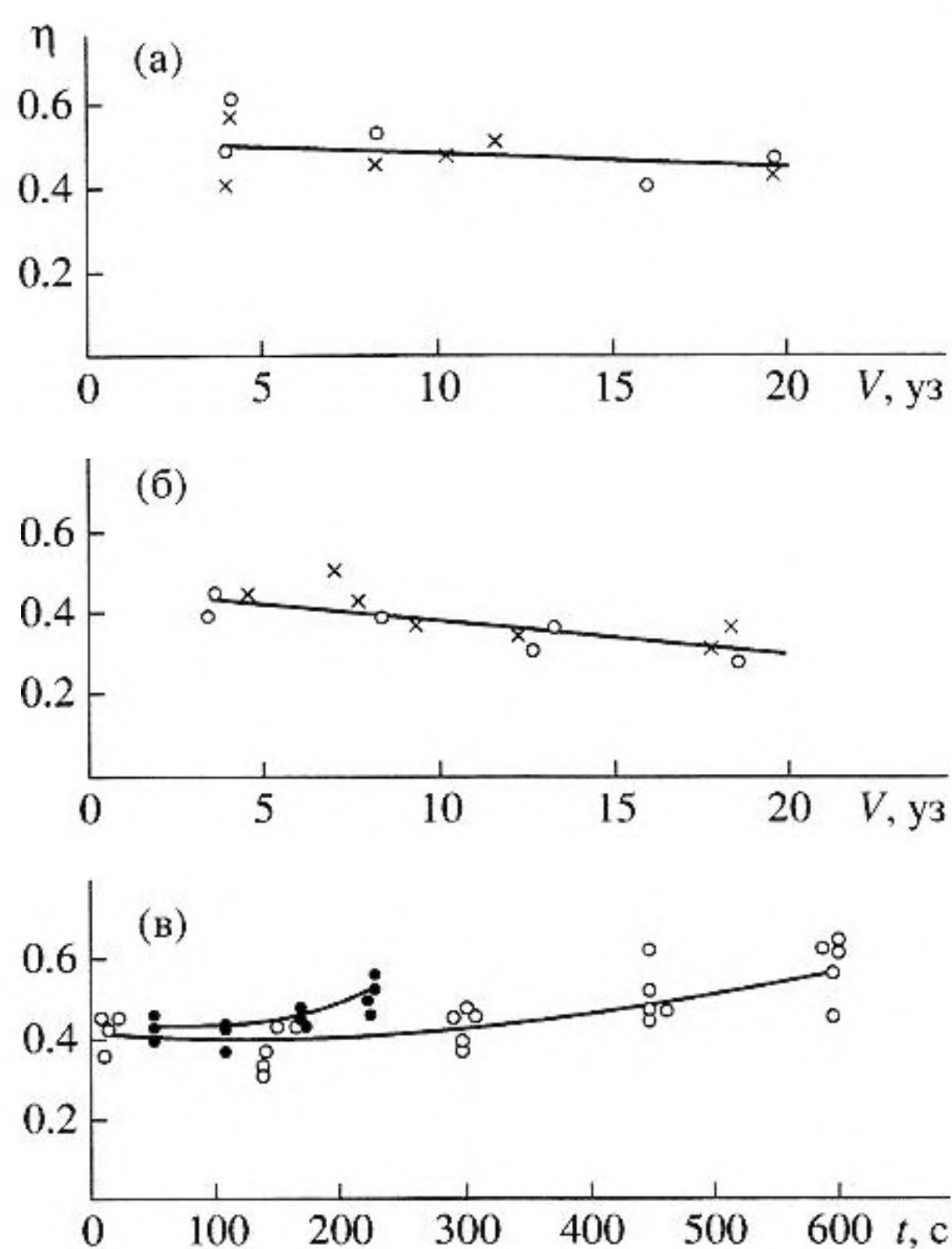


Рис. 8. Зависимости коэффициента вариации амплитуды сигналов, рассеянных кильватерной струей, от скорости движения морского судна (а, б) и от времени существования кильватерной струи (в) при горизонтальном бортовом облучении: (а) — $f = 7$ кГц, $T_0 = 3$ мс (○), 10 мс (×); (б) — $f = 36$ кГц, $T_0 = 3$ мс (○), 10 мс (×); (в) — $f = 36$ кГц, $T_0 = 10$ мс, $V = 6$ уз (●), 24 уз (○).

ших скоростях колеблется около значения, близкого к 0.5. Количество резонансных пузырьков в КС на частоте 7 кГц невелико, поэтому когерентная составляющая рассеянных сигналов мала, а флуктуации амплитуды близки к рэлеевским. На частоте 36 кГц заметно уменьшение КВА с увеличением скорости хода МС, при этом значения КВА в среднем неплохо следуют зависимости $\eta \sim V^{-1/2}$. КВА для отдельных блоков эхосигналов от разных участков КС, соответствующих различным временам его существования, остается практически неизменным до некоторого момента времени, а затем начинает возрастать, достигая 0.6–0.7. Промежуток времени, в течение которого КВА в среднем не изменяется, может служить оценкой эффективной акустической длины КС. Вид функций распределения амплитуды эхосигналов от КС изменяется в зависимости от времени его существования. Для эхосигналов от начальных участков КС при высоком содержании газовых пузырьков распределения удовлетворительно описываются законом Райса (в 85% случаев) с КВА $\eta \approx 0.35$ –0.45. Для участков старых, разрушающихся КС распределения амплитуды

ближе к рэлеевским, но встречается много распределений с КВА $\eta > 0.52$. Коэффициент когерентности, определенный по распределениям Райса, значительно меньше единицы при $f = 7$ кГц, $V = 4$ –5 уз и возрастает до 1–1.5 при $f = 36$ кГц, $V = 20$ уз. С помощью приведенной выше формулы для β^2 можно оценивать концентрацию газовых пузырьков различных размеров в КС МС по значениям коэффициента когерентности.

Таким образом, в статье представлены результаты экспериментальных исследований энергетических и вероятностных характеристик флуктуаций амплитуды эхосигналов от морских судов и их кильватерных следов (струй) в условиях ближней гидролокации при излучении коротких тонально-импульсных сигналов в широком диапазоне высоких звуковых и ультразвуковых частот. Исследованы зависимости интенсивности флуктуаций эхосигналов от скорости движения МС и от частоты излучения при вертикальном и горизонтальном облучении судов. Выявлено разнообразие форм функций распределения амплитуды эхосигналов от корпуса МС в присутствии пограничного слоя. Исследованы характеристики флуктуаций сигналов, рассеянных кильватерным следом МС, в зависимости от глубины проникновения воздушных пузырьков и времени существования КС. Экспериментально подтверждено наличие когерентной составляющей в сигналах, рассеянных КС, при достаточно высокой концентрации воздушных пузырьков. Рассмотрены статистические модели эхосигналов, позволяющие интерпретировать полученные экспериментальные данные. Результаты исследований могут быть использованы при имитационном моделировании с целью оценки эффективности распознавания объектов подводного наблюдения в режиме активной гидролокации. В частности, при статистическом описании классификационных признаков, содержащихся в эхосигналах от МС и их КС, необходимо учитывать, что функции распределения амплитуды эхосигналов, которые описывают отражательную способность МС, существенно зависят от параметров движения МС, частоты излучения и способа обработки принимаемых сигналов. При взаимно-корреляционном способе обработки эхосигналов и использовании в качестве классификационного признака акустической протяженности объекта эхолоцирования для идентификации эхосигналов от МС на фоне всплесков реверберации и донных отражений необходимо учитывать наличие когерентной составляющей в сигналах, рассеиваемых кильватерным следом. Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-08-01366-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические основы подводной акустики / Пер. с англ. М.: Сов. Радио. 1955. С. 573–586.
2. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики / Пер. с англ. Л.: Судостроение. 1978. С. 304–342.
3. Ильичев В.И. Акустические методы исследования двухфазных пограничных слоев и спутных течений // Труды института. Акустический институт. М.: 1967. Вып. 2. С. 33–42.
4. Cook J.C. Target strength and echo structure // Adaptive methods in underwater acoustics. Dordrecht. a.o. a Reidel. 1984. P. 155–172.
5. Бородулин В.Ю., Огородников И.А. Экспериментальное исследование обратного рассеяния ультразвука от неоднородностей кильватерного следа надводного судна // Динамика сплошной среды. Новосибирск. 1992. № 105. С. 61–69.
6. Тимошенко В.Г. Спектральные характеристики эхосигналов в условиях дальней локации // Труды 11-й научно-технической конфер. ВВМИРЭ им. А.С. Попова. Петродворец. 2000.
7. Филлин Г.Д. Модели флуктуаций огибающей вторичного поля объектов сложной формы при импульсном излучении // Труды 8-го Всесоюз. симпозиума “Методы представления и аппаратурный анализ случайных процессов и полей”. Л.: 1975.
8. Стрелков И.М. О влиянии флуктуаций эхосигналов на дальность действия поискового гидролокатора // Акустика океана. Сб. трудов. М.: 1998. С. 326–330.
9. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. М.: Радио и связь. 1986. С. 63–70.
10. Всехсвятская И.С. Статистические свойства сигналов, отраженных от ионосферы. М.: Наука. 1973. С. 27–35.
11. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации. Л.: Судостроение. 1973. С. 102–113.
12. Buddruss C.P. Experimentelle Untersuchungen zur Kohärenz von Durchgangs – und Rückstreuung einer Luftblasen-Wasser-Schicht // Acustica. 1971. V. 24. № 3. P. 147–159.
13. Курьянов Б.Ф. О когерентном и некогерентном рассеянии волн на совокупности точечных рассеивателей, случайно расположенных в пространстве // Акуст. журн. 1964. Т. 10. № 2. С. 195–201.
14. Глотов В.П., Колобаев П.А., Неуймин Г.Г. Исследование рассеяния звука пузырьками, создаваемыми искусственным ветром в морской воде, и статистического распределения размеров пузырьков // Акуст. журн. 1961. Т. 7. № 4. С. 421–427.

An Experimental Study of the Fluctuations of Acoustic Signals Reflected from Ships

D. V. Guzhavina and É. P. Gulin

*Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia
e-mail: bvp@akin.ru*

Abstract—Results of an experimental study of amplitude fluctuations in echo signals received from ships and their wakes are presented for the cases of vertical and horizontal sounding in a wide range of high sonic and ultrasonic frequencies. Dependences of the amplitude variation coefficients of echo signals on the speed of ship motion, the sounding frequency, the duration of sounding pulses, and the height of wind waves on the sea surface are analyzed. The probability characteristics of echo signals reflected from the ship hulls and from the wakes at different depths are discussed.