

УДК 551.463

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РЕФРАКЦИИ НА ФЛУКТУАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В МОРЕ

© 1997 г. Э. П. Гулин, К. И. Малышев

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 26.06.96 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования флуктуаций амплитуды гидроакустических сигналов в Черном море в диапазоне частот 4–36 кГц. Получены зависимости коэффициентов вариации амплитуды прямых (не имеющих контактов с поверхностью и дном моря) и отраженных от взволнованной поверхности импульсных сигналов от расстояния до источника излучения в условиях слабых градиентов скорости звука, наблюдавшихся в зимне-весенний период. Анализируются причины наблюдавшихся флуктуаций сигналов и дается объяснение полученных экспериментальных данных.

В конце 50-х годов в рамках проводившихся под руководством Ю.М. Сухаревского комплексных исследований гидроакустических сигналов и помех на Сухумской научной морской станции Акустического института были выполнены экспериментальные исследования флуктуаций акустических сигналов в Черном море. В опубликованных к тому времени работах [1–3] было выявлено нарастание флуктуаций с увеличением расстояния между излучателем и приемником, обусловленное случайными объемными неоднородностями скорости звука (тепловой микроструктурой морской среды), установлено существенное воздействие взволнованной поверхности моря (особенно на небольших расстояниях до излучателя), а также перемещений источника излучаемых сигналов и приемника при движении (дрейфе) и качке носителей излучателя и приемной антенны.

Однако в этих работах не акцентировалось внимание на анализе влияния рефракции звука на интенсивность флуктуаций сигналов, которое может оказаться существенным даже при сравнительно небольших расстояниях (порядка нескольких километров) до излучателя. В настоящей работе приводятся ранее не публиковавшиеся результаты экспериментальных исследований флуктуаций амплитуды гидроакустических сигналов на одной из трасс Черного моря для гидролого-акустических условий, наблюдавшихся в зимне-весенний период. Часть результатов, относящихся к исследованиям статистических характеристик сигналов, отраженных от взволнованной морской поверхности, была опубликована в работах [4, 5].

В появившейся позднее серии работ были подробно исследованы флуктуации акустических сигналов, вызванные турбулентными пульсациями скорости звука [6, 7], внутренними волнами [8, 9], отражением от неровного и неоднородного дна

при движущихся излучателе и/или приемнике [10]. В выяснении причин наблюдаемых флуктуаций существенную роль сыграли эксперименты на стационарных трассах – при фиксированном положении источника и приемника акустических сигналов [11, 12]. Проведены также исследования флуктуаций акустических сигналов в широком диапазоне частот с использованием дрейфовавших гидрофонов [13, 14]. Результаты экспериментальных исследований флуктуаций гидроакустических сигналов, обусловленных различными причинами, обобщены в монографиях [15–17]. Интерес к экспериментальным исследованиям флуктуационных явлений при распространении звука на океанических и морских трассах сохраняется до сих пор [18–26], при этом в последние годы большая часть экспериментов проводилась на стационарных или “квазистационарных” (при установке излучателя и/или приемной системы на заякоренных платформах с положительной плавучестью) трассах.

Выполненные нами экспериментальные исследования проводились с использованием установленных на склоне дна в береговом клине трех излучающих акустических систем, находившихся на глубинах 4, 25 и 80 м, и ненаправленных гидрофонов, опускавшихся с борта дрейфовавшего судна-носителя приемно-регистрирующей аппаратуры примерно на такие же глубины. Каждая излучающая акустическая антенна состояла из набора излучателей с резонансными частотами 4, 7, 11, 15, 25 и 36 кГц и эффективной шириной полосы пропускания около 10% относительно центральной частоты. Эффективная ширина горизонтально ориентированного главного лепестка характеристики направленности излучателей в вертикальной плоскости составляла на разных частотах 8°–12°. Поскольку углы наклона дна вдоль исследуемой трассы были достаточно вели-

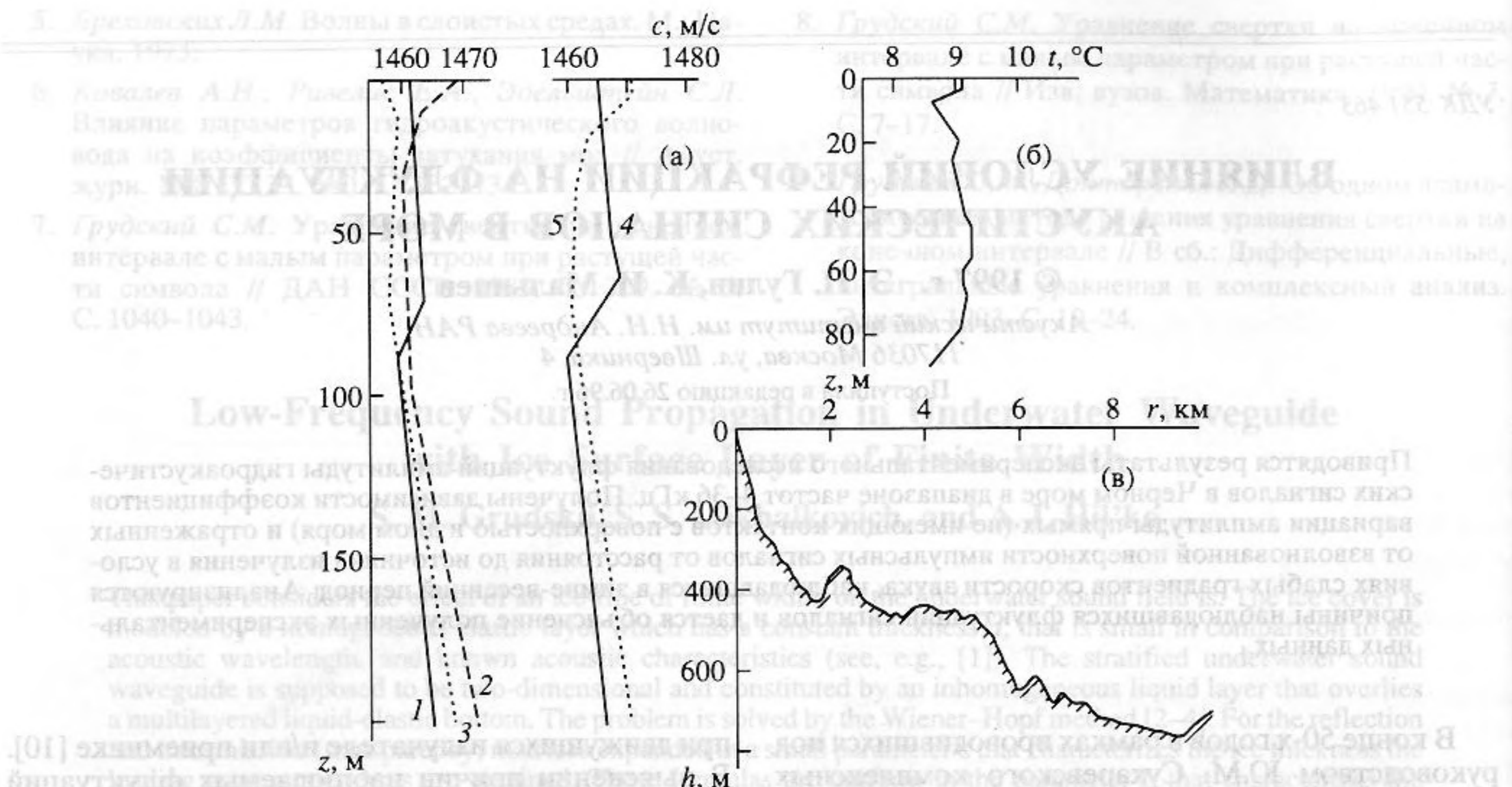


Рис. 1. Вертикальные распределения скорости звука во время проведения экспериментальных исследований (а), распределение температуры по глубине при исследовании температурных флуктуаций (б) и рельеф дна вдоль трассы распространения звука (в).

ки (около  $15^\circ$  до глубины 65 м,  $24^\circ$ – $26^\circ$  на глубинах 65–240 м, примерно  $10^\circ$  на глубинах 240–450 м и в среднем примерно  $6^\circ$  на глубинах 450–800 м), основная доля энергии акустического поля передавалась по лучам, не имевшим контактов с дном, при этом приближенно имитировались условия распространения звука в глубоком море для случая направленных в вертикальной плоскости источников излучения. Эффективная угловая ширина сектора излучения в горизонтальной плоскости составляла  $30^\circ$ – $40^\circ$ .

В процессе проведения экспериментов принимающее судно переходило от точки к точке вдоль трассы распространения звука, проходившей по направлению на юг от оконечности Сухумийского мыса, и на каждой дистанции осуществлялась регистрация принимаемых на различных глубинах сигналов разных частот. Исследования выполнялись как в импульсном, так и в непрерывном режимах излучения. Длительность излучаемых импульсов  $T_{\text{и}}$  изменялась от 1 до 30 мс, но в большей части экспериментов составляла  $T_{\text{и}} = 1$ –3 мс. Период повторения импульсов изменялся от 0.1 до 1 с. Продолжительность записей сигналов в зависимости от характерных периодов флуктуаций составляла от 2–3 до 10–20 мин.

В зимний и весенний периоды наблюдений вертикальные градиенты скорости звука в районе проведения экспериментов достаточно малы и гидрологические условия близки к изотермическим. Иногда на глубинах 60–80 м формируется не

ярко выраженный слой температурного скачка, а у поверхности моря образуется прогретый или охлажденный слой (соответственно с отрицательным или положительным градиентами скорости звука). В это время распространение звука происходит в условиях слабо выраженной слоистости с определенным влиянием подводного или приповерхностного каналов (в зависимости от глубин погружения излучателя и приемника).

На рис. 1 приведены аппроксимированные кусочно линейными профилями вертикальные распределения скорости звука (ВРСЗ), которые были зарегистрированы во время акустических экспериментов в поверхностном слое толщиной 200 м. На глубинах больше 200–300 м градиенты скорости звука приближались к гидростатическому. На этом же рисунке изображен рельеф дна вдоль исследуемой трассы распространения звука. В табл. 1 представлены сводные данные о состоянии морской поверхности во время проведения акустических экспериментов при различных ВРСЗ, наблюдавшихся на трассе распространения звука.

В таблице введены следующие обозначения:  $v_{\text{в}}$  – скорость ветра,  $T_{\xi}$  – период волнения,  $H_{\text{max}}$  – максимальная высота волны (из 10 последовательных волн),  $\sigma_{\xi}$  – среднеквадратичное возвышение поверхности. Величины  $T_{\xi}$ ,  $H_{\text{max}}$ ,  $\sigma_{\xi}$  определялись путем статистической обработки записей смещений уровня водной поверхности  $\xi(t)$ , зарегистрированных струнным волнографом (он находился на начальном участке трассы в точке с

Таблица 1

№ ВРСЗ	Тип волн.	Степень волн., баллы	$v_B$ , м/с	$T_\zeta$ , с	$H_{max}$ , см	$\sigma_\zeta$ , см
1	зыбь	2	<1	5	40	8
2	зыбь	1	1	5	25	5
3	ветр. + зыбь	2-3	4	4.5	70	12
4	зыбь	1-2	2	4	30	5.5
5	зыбь	1-2	1	5	35	6

глубиной моря около 20 м). С помощью установленного на берегу перспектометра выполнялись также визуальные наблюдения за состоянием морской поверхности и характеристиками волнения.

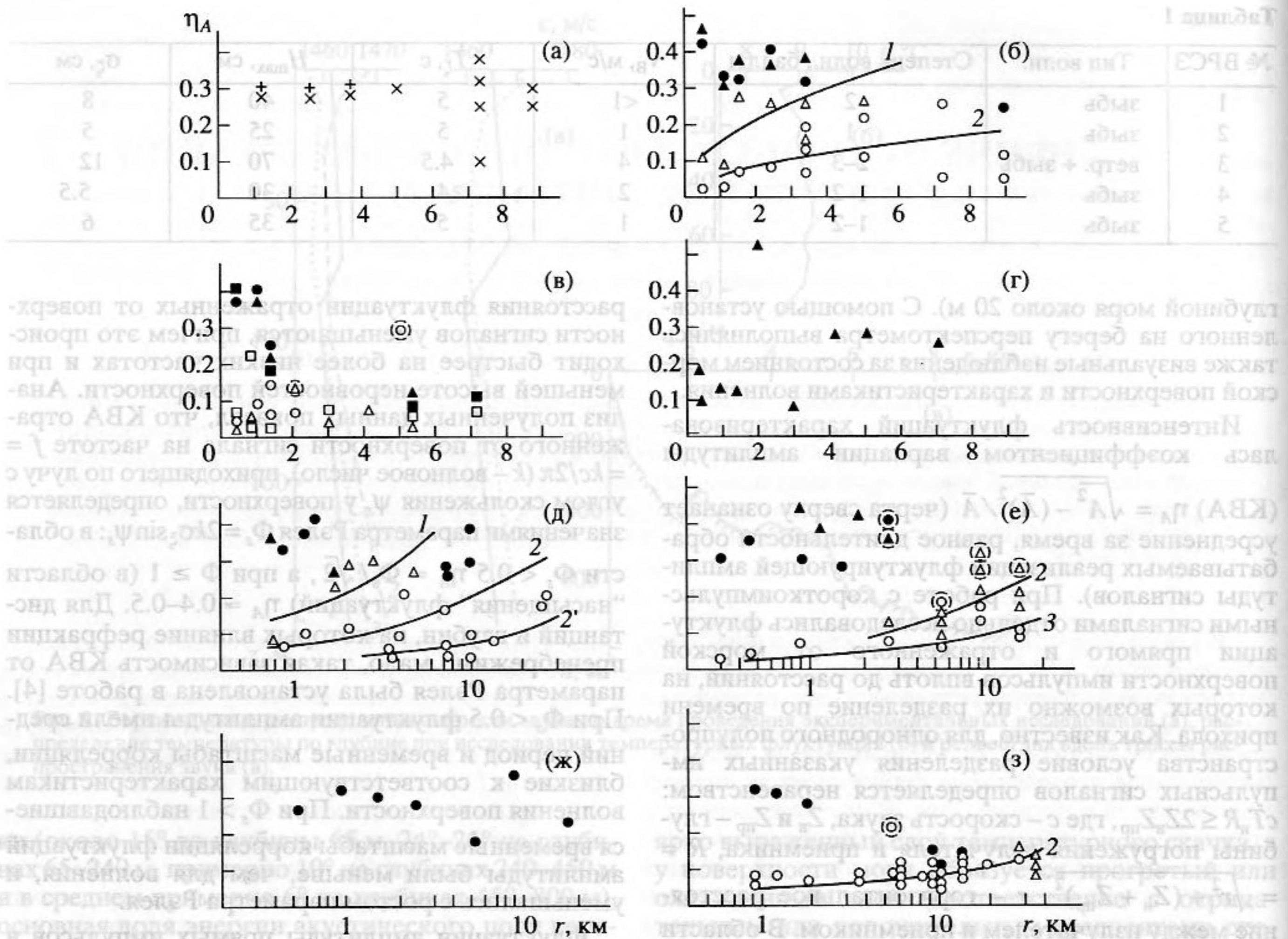
Интенсивность флуктуаций характеризовалась коэффициентом вариации амплитуды

(КВА)  $\eta_A = \sqrt{A^2 - (\bar{A})^2} / \bar{A}$  (черта сверху означает усреднение за время, равное длительности обрабатываемых реализаций флуктуирующей амплитуды сигналов). При работе с короткоимпульсными сигналами отдельно исследовались флуктуации прямого и отраженного от морской поверхности импульсов вплоть до расстояний, на которых возможно их разделение по времени прихода. Как известно, для однородного полупространства условие разделения указанных импульсных сигналов определяется неравенством:  $cT_n R \leq 2Z_n Z_{np}$ , где  $c$  – скорость звука,  $Z_n$  и  $Z_{np}$  – глубины погружения излучателя и приемника,  $R = \sqrt{r^2 + (Z_n + Z_{np})^2}$ ,  $r$  – горизонтальное расстояние между излучателем и приемником. В области перекрытия прямого и отраженного импульсов при достаточно малых заглублениях излучателя и/или приемника определялись КВА в суммарном поле звуковой волны. На достаточно большом удалении от излучателя начинает проявляться многолучевое распространение сигналов, когда в точке приема накладываются несколько сигналов, приходящих разными путями. В таких случаях при короткоимпульсном излучении наблюдалась многоблочная структура принимаемых сигналов, а флуктуации амплитуды определялись для каждого энергетического импульса (или блока перекрывающихся импульсов).

На рис. 2 приведены зависимости КВА импульсных ( $T_n = 1$  и 3 мс) и непрерывных тональных сигналов разных частот ( $f = 4, 7, 15$  и 36 кГц) от расстояния между излучателем и приемником при глубине источника излучения 80 м для серии экспериментов, выполненных при различных ВРСЗ и различном состоянии морской поверхности (см. рис. 1 и табл. 1). Из приведенных на рис. 2 графиков следует, что в области разделения прямого и отраженного от поверхности импульсов, принятых на глубине около 80 м и на дистанциях до 1–2 км, флуктуации отраженных сигналов на всех частотах в диапазоне 4–36 кГц заметно превышают флуктуации прямых сигналов. С увеличением

расстояния флуктуации отраженных от поверхности сигналов уменьшаются, причем это происходит быстрее на более низких частотах и при меньшей высоте неровностей поверхности. Анализ полученных данных показал, что КВА отраженного от поверхности сигнала на частоте  $f = kc/2\pi$  ( $k$  – волновое число), приходящего по лучу с углом скольжения  $\psi_s$  у поверхности, определяется значениями параметра Рэлея  $\Phi_s = 2k\sigma_\zeta \sin \psi_s$ : в области  $\Phi_s < 0.5$   $\eta_A = \Phi_s / \sqrt{2}$ , а при  $\Phi_s \geq 1$  (в области “насыщения” флуктуаций)  $\eta_A = 0.4-0.5$ . Для дистанций и глубин, на которых влияние рефракции пренебрежимо мало, такая зависимость КВА от параметра Рэлея была установлена в работе [4]. При  $\Phi_s < 0.5$  флуктуации амплитуды имели средний период и временные масштабы корреляции, близкие к соответствующим характеристикам волнения поверхности. При  $\Phi_s > 1$  наблюдавшиеся временные масштабы корреляции флуктуаций амплитуды были меньше, чем для волнения, и уменьшались с ростом параметра Рэлея.

Флуктуации амплитуды прямых импульсов в среднем, при заметном разбросе значений КВА, обусловленном ошибкой его определения (относительная среднеквадратичная погрешность оценок КВА согласно оценкам составляла 15–20%), для большей части экспериментов увеличиваются с дистанцией. Особенно четко этот эффект выражен на высоких частотах используемого диапазона ( $f = 36$  и 15 кГц). С увеличением частоты КВА, как правило, возрастают. Интересно отметить, что из-за влияния рефракции даже в условиях слабых градиентов скорости звука для импульсов длительностью 1–3 мс при излучении и приеме под слоем температурного скачка на глубинах около 80 м отсутствует существующая в однородном полупространстве область перекрытия прямого и отраженного от морской поверхности импульсов на достаточно больших дистанциях. Это объясняется экранирующим воздействием слоя скачка и прогретого поверхностного слоя, приводящим к более быстрому по сравнению со случаем однородного полупространства уменьшению углов скольжения лучей у поверхности и появлению лучей с малыми углами выхода, не достигающих до поверхности (рефрагирующих в объеме водной среды). В результате для лучей, имеющих контакт с поверхностью, образуется своеобразная зона геометрической тени, в ко-



**Рис. 2.** Коэффициенты вариации амплитуды акустических сигналов ( $\eta_A$ ) на различных расстояниях до излучателя в условиях слабо выраженной слоистости при  $Z_n = 80$  м. а, б – ВРСЗ № 1,  $T_n = 1$  мс; а –  $Z_{пр} = 4$  м,  $\times - f = 15$  кГц,  $\circ - f = 36$  кГц; б –  $Z_{пр} = 80$  м,  $\circ - f = 15$  кГц,  $\Delta - f = 36$  кГц. в, г – ВРСЗ № 2,  $Z_{пр} = 80$  м; в –  $T_n = 3$  мс,  $\square - f = 4$  кГц,  $\Delta - f = 7$  кГц,  $\circ - f = 15$  кГц; г –  $f = 7$  кГц, непрерывный сигнал. д – ВРСЗ № 3,  $Z_{пр} = 80$  м,  $T_n = 1$  мс,  $\circ - f = 15$  кГц,  $\Delta - f = 36$  кГц. е, ж – ВРСЗ № 4,  $Z_{пр} = 80$  м; е –  $T_n = 3$  мс,  $\Delta - f = 7$  кГц,  $\circ - f = 15$  кГц; ж –  $f = 7$  кГц, непрерывный сигнал. з – ВРСЗ № 5,  $Z_{пр} = 80$  м,  $T_n = 1$  мс,  $\circ - f = 15$  кГц,  $\Delta - f = 7$  кГц. Незачерненные значки соответствуют прямому импульсу, зачерненные значки – импульсу, отраженному от поверхности моря, обведенные пунктиром значки – медленно флуктуирующим сигналам. 1, 2, 3 – теоретические кривые для частот 36, 15 и 7 кГц.

торой отсутствуют отраженные от поверхности импульсы. Переход в такую зону тени, начинающуюся для разных ВРСЗ с 2–4 км, сопровождается уменьшением флуктуаций принимаемых сигналов на частотах 4–15 кГц (рис. 2в, 2д, 2е, 2ж, 2з). При наличии поверхностного слоя достаточно большой толщины с положительным градиентом скорости звука для лучей с малыми углами скольжения у поверхности перед упомянутой выше зоной тени (или вместо нее) образуется область расфокусировки с малыми уровнями отраженных от поверхности сигналов. Флуктуации возрастают при вторичных выходах к поверхности глубинных лучей, которые появляются на дистанциях 5–13 км (в зависимости от вида ВРСЗ). Из-за уменьшения углов скольжения лучей у поверхности в зонах вторичного выхода при отрицательном градиенте

скорости звука в поверхностном слое (рис. 2в, 2з) флуктуации амплитуды отраженных от поверхности импульсов заметно слабее, чем при положительном градиенте (рис. 2б, 2д). На больших дистанциях вторичные выходы лучей к поверхности перемежаются с зонами тени для поверхностных лучей вплоть до полного перекрытия соседних вторичных выходов и формирования приповерхностного канала. Отсутствие на графиках рис. 2д, 2е, 2з точек, соответствующих КВА отраженных от морской поверхности сигналов в зонах вторичных выходов лучей к поверхности (а также в области расфокусировки поверхностных лучей), связано с тем, что эти сигналы имели невысокий уровень, а статистическая обработка проводилась лишь для энергосомых импульсов.

Многоблочная структура принимаемых сигналов, обусловленная многолучевостью, проявляется уже начиная с расстояний 3–5 км, при этом КВА для импульсов, приходящих по разным лучам (группам лучей с малой разностью времен запаздывания), на всех частотах заметно различаются (рис. 2б, 2д, 2е). При разбросе значений КВА прямых импульсов на рис. 2д можно подметить различие КВА для двух групп импульсных сигналов. Сопоставление наблюдавшейся временной структуры принимаемых сигналов с результатами расчетов лучевой структуры поля для условий эксперимента показало, что сильнее флуктуируют импульсы, распространяющиеся по лучам, выходящим вниз и имеющим одну точку заворота на достаточно большой глубине. КВА импульсов, представляющих собой наложение сигналов, приходящих по канальным лучам с малыми углами выхода и малой разностью времен запаздывания, существенно меньше и медленнее увеличиваются с расстоянием.

Наряду с быстрыми флуктуациями, имевшими временные масштабы корреляции порядка одной–нескольких секунд, в ряде случаев наблюдались медленные (минутные) вариации амплитуды (значки на графиках рис. 2, соответствующие КВА сигналов, испытывающих наряду с быстрыми флуктуациями медленные вариации, обведены пунктиром). В присутствии медленных вариаций КВА возрастают до 0.2–0.4, при этом появление медленно флуктуирующих сигналов чаще регистрировалось на дистанциях вблизи границ зоны тени для поверхностных лучей, т.е. для лучей с точками заворота вблизи верхней границы слоя скачка при положительных градиентах скорости звука в поверхностном слое и вблизи поверхности при отрицательных градиентах у поверхности (рис. 2в, 2е, 2з).

На флуктуации амплитуды тонально непрерывных сигналов существенно сказываются два фактора: направленность излучения в вертикальной плоскости, приводящая к ослаблению уровня отраженного от поверхности сигнала относительно уровня прямого сигнала при мало отличающихся глубинах излучателя и приемника на дистанциях до 1–2 км (в случае короткоимпульсных сигналов отраженные от поверхности импульсы на небольших дистанциях формировались боковыми лепестками излучателя), и интерференция сигналов, приходящих по разным лучам, которая приводит к значительному разбросу значений КВА в зависимости от средней амплитуды суммарного акустического поля. При значительном разбросе значений КВА (от 0.1–0.2 до 0.4–0.5) определенной его зависимости от дистанции на частоте 7 кГц не наблюдается (рис. 2г, 2ж).

При малой глубине приемника в случае положительного градиента скорости звука у поверхности для перекрывающихся прямого и отраженного от поверхности импульсов (рис. 2а) КВА

сигналов на частотах 15 и 36 кГц слабо зависят от дистанции и составляют в среднем около 0.3.

Контроль за уровнем излучения, осуществлявшийся в ходе проведения экспериментов, показал, что его относительная нестабильность не превышала 3–5%. Это соответствует приведенным на рис. 2 минимальным значениям КВА на небольших расстояниях. Вертикальные и горизонтальные перемещения звукоприемников, обусловленные качкой и дрейфом судна – носителя приемной системы, могут привести к вариациям амплитуды импульсных сигналов в областях резких пространственных изменений факторов фокусировки лучей или в условиях интерференции сигналов, приходящих с малой разностью времен запаздывания (не превышающей длительности излучаемых импульсов). Однако этими причинами нельзя объяснить наблюдавшийся в большей части случаев, особенно на достаточно высоких частотах (15 и 36 кГц), рост флуктуаций амплитуды с дистанцией. Такое поведение флуктуаций сигналов может быть обусловлено рассеянием на случайных неоднородностях скорости звука, при этом временные флуктуации амплитуды могут возникнуть как при переносе неоднородностей со скоростью течения, так и при перемещениях звукоприемника в случайно-неоднородной среде.

Согласно теории распространения волн в случайно-неоднородных средах [16, 27, 28] КВА акустических сигналов при достаточно малых флуктуациях ( $\eta_A^2 \ll 1$ ) на дистанциях  $r \gg \tilde{a}^2/\lambda$  можно оценивать выражением

$$\eta_A = k \frac{\sigma_c}{c} \sqrt{\tilde{a}r}, \quad (1)$$

где  $\sigma_c$  – среднеквадратичное отклонение (СКО) скорости звука,  $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ ,  $\tilde{a}$  – интегральный масштаб неоднородностей, определяемый соотношением  $\tilde{a} = \int_0^\infty \Gamma_c(\rho) d\rho$ ,  $\Gamma_c(\rho)$  – нормированная пространственная функция корреляции флуктуаций

скорости звука. При  $\Gamma_c(\rho) = \exp\left(-\frac{|\rho|}{a}\right)$   $\tilde{a} = a$ .

В случае среды с локально изотропной турбулентностью, описываемой структурной функцией вида  $D_c(\rho) = C_c^2 \rho^{2/3}$  при  $\rho \leq a_0$  и  $D_c(\rho) = 0$  при  $\rho > a_0$  [29],  $\tilde{a} = 0.4a_0$ , где  $a_0$  – внешний масштаб турбулентности,  $C_c = \sqrt{2} \sigma_c a_0^{-1/3}$  – структурная постоянная для флуктуаций скорости звука.

С целью оценки возможного вклада случайных неоднородностей во время проведения акустических экспериментов были выполнены исследования тепловой микроструктуры (температурных неоднородностей), определяющей флуктуации

скорости звука, с помощью высокочувствительных точечных датчиков температуры, установленных на подводной лодке, перемещавшейся со скоростью 1.5–2 м/с на глубинах от 8 до 90 м (повторение экспериментов Либермана [30]). Вертикальное распределение температуры при исследованиях температурных флуктуаций приведено на рис. 16. По температурным разрезам на различных глубинах можно оценить не только СКО температуры  $\sigma_t$ , но и пространственные масштабы неоднородностей, поскольку скорость перемещения температурных датчиков заведомо превышала скорость переноса неоднородностей за счет течения, составляющую 10–20 см/с на всех глубинах до 100 м.

Исследования выявили существенную зависимость флуктуаций температуры от глубины, при этом в большей части случаев пространственные функции корреляции температурных флуктуаций удовлетворительно аппроксимировались линейной экспонентой ( $\tilde{a} = a$ ), однако приемлемой оказалась и аппроксимация “законом двух третей” для локально изотропной турбулентности с внешним масштабом  $a_0 = 2.5a$ . На глубине 8 м наблюдались достаточно крупномасштабные неоднородности размером  $a = 10$  м с СКО температуры  $\sigma_t = 0.01^\circ\text{C}$ . На глубинах 20–55 м в пределах точности измерений флуктуации температуры отсутствовали ( $\sigma_t < 0.002^\circ\text{C}$ ). На глубине 60 м в части записей наблюдались заметные температурные флуктуации с СКО  $\sigma_t = 0.03^\circ\text{C}$  и масштабом неоднородностей  $a = 0.75$  м. На глубине 70 м большая часть записи содержала температурные флуктуации с  $\sigma_t = 0.015\text{--}0.02^\circ\text{C}$ , причем на сравнительно крупномасштабные неоднородности ( $a = 2.5$  м) накладывались мелкомасштабные ( $a = 0.55$  м). На глубине 80 м  $\sigma_t = 0.005^\circ\text{C}$ ,  $a = 1$  м. На глубине 90 м  $\sigma_t = 0.02^\circ\text{C}$ ,  $a = 1.8$  м. Значения СКО скорости звука в соответствии с зависимостью скорости звука от температуры для профиля, изображенного на рис. 16, составляют (в м/с) примерно  $\sigma_c = 3.5\sigma_t$ . Таким образом, величина  $\sigma_t$  в зависимости от глубины изменялась в пределах от  $\sigma_t < 0.002^\circ\text{C}$  до  $\sigma_t = 0.03^\circ\text{C}$  и в среднем для поверхностного слоя толщиной около 100 м составляла  $\bar{\sigma}_t = (0.01\text{--}0.015)^\circ\text{C}$ . Пространственные масштабы неоднородностей на глубинах 20–90 м изменялись в пределах от 0.5 до 2.5 м со средним значением  $\tilde{a} = 1$  м.

Приведенные на рис. 2 теоретические кривые, наилучшим образом описывающие зависимости экспериментальных значений КВА от расстояния на частотах 36, 15 и 7 кГц, построены по формуле (1) для  $\tilde{a} = 1$  м и  $\sigma_t = 0.014^\circ\text{C}$  (рис. 2б, 2д, 2е, кривые 1, 2, 3),  $\sigma_t = 0.0055^\circ\text{C}$  (рис. 2д, кривая 2). Меньшие значения КВА для канальных лучей с малыми углами скольжения могут быть связаны как с уменьшением температурных флуктуаций

на глубинах в окрестности оси ПЗК, так и с усреднением флуктуаций сигналов, вызванным “конструктивной” интерференцией сигналов, приходящих по канальным лучам (в последнем случае выбранные для аппроксимации значения будут соответствовать некоторым эквивалентным значениям интенсивности температурных флуктуаций). Теоретическая кривая на рис. 2з построена по формуле  $\eta_A(r) = \sqrt{\eta_1^2 + \tilde{\eta}_A^2(r)}$ , где  $\eta_1 = 0.05$ , а  $\tilde{\eta}_A^2(r)$  определяется соотношением (1) при  $\tilde{a} = 1$  м,  $\sigma_t = 0.0055^\circ\text{C}$ . Не зависящий от расстояния уровень флуктуаций может быть связан с интерференционными изменениями амплитуды сигналов при вертикальных перемещениях приемника. Следует отметить, что нередко временные функции корреляции флуктуаций амплитуды прямых импульсов имеют значительную антикорреляцию и квазигармонический характер, при этом период их изменений близок к периоду бортовой качки судна – носителя приемной системы (около 8 с). Аналогичный вид корреляционных кривых для амплитудных флуктуаций прямых импульсных сигналов наблюдался и в работе [3].

Таким образом, по результатам экспериментального исследования флуктуаций акустических сигналов в Черном море установлена существенная зависимость КВА прямых и отраженных от морской поверхности сигналов от условий рефракции и глубин погружения источника и приемника звука даже при малых вертикальных градиентах скорости звука в морской среде для диапазона высоких звуковых и ультразвуковых частот (4–36 кГц). Рассмотрены особенности поведения интенсивности флуктуаций амплитуды сигналов, связанные с экранирующим воздействием слоя скачка и влиянием поверхностного слоя с положительным и отрицательным градиентами. Наблюдавшиеся зависимости КВА от расстояния в интервале дистанций от нескольких сотен метров до нескольких десятков километров находят объяснение в рамках приближенной теории рассеяния волн на неровных поверхностях и теории распространения волн в средах со случайными неоднородностями с учетом интерференционных изменений суммарного уровня поля в многолучевом канале, вызванных вертикальными перемещениями и горизонтальным дрейфом приемной системы.

Авторы выражают свою признательность Ю.М. Сухаревскому за постоянный интерес к работе и ценные замечания, а также сотрудникам бывшей Сухумской научной морской станции Акустического института, принимавшим участие в проведении экспериментальных последований, за помощь в работе. Подготовка данной статьи к печати проходила при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 96-02-18430-а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические основы подводной акустики. Пер. с англ. / Под ред. Мясищева В.И. М.: Сов. радио, 1955.
2. Sheehy M.J. Transmission of 24-kc underwater sound from a deep source // J. Acoust. Soc. Amer. 1950. V. 22. № 1. P. 24–28.
3. Whitmarsh D.C., Skudrzyk E., Urick R.J. Forward scattering of sound in the sea and its correlation with the temperature microstructure // J. Acoust. Soc. Amer. 1957. V. 29. № 10. P. 1124–1143.
4. Гулин Э.П., Мальшиев К.И. О статистических свойствах звуковых сигналов, отраженных от волнующейся поверхности моря // Акуст. журн. 1962. Т. 8. № 3. С. 292–300.
5. Гулин Э.П., Мальшиев К.И. Некоторые опыты по изучению пространственной корреляции флуктуаций амплитуды и фазы звуковых сигналов, отраженных от волнующейся поверхности моря // Акуст. журн. 1964. Т. 10. № 4. С. 425–430.
6. Швачко Р.Ф. Флуктуации звука в верхнем слое океана и их связь со случайными неоднородностями среды // Акуст. журн. 1963. Т. 9. № 3. С. 347–350.
7. Швачко Р.Ф. Флуктуации звука и случайные неоднородности в океане // Акуст. журн. 1967. Т. 13. № 1. С. 119–125.
8. Kennedy R.M. Phase and amplitude fluctuations in propagating through a layered ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1969. V. 46. № 3. Pt 2. P. 737–745.
9. Porter R.P., Spindel R.C., Jaffee R.J. Acoustic-internal wave interaction at long ranges in the ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 56. № 5. P. 1426–1436.
10. Воловов В.И., Житковский Ю.Ю. Отражение и рассеяние звука дном океана // Акустика океана. М.: Наука, 1974. С. 395–490.
11. Steinberg J.C., Clark J.G., DeFerrari H.A., Kronengold M., Yasoub K. Fixed-system studies of underwater-acoustic propagation // J. Acoust. Soc. Amer. 1972. V. 52. № 5. Pt. P. 1521–1536.
12. Stanford G.E. Low-frequency fluctuations of a CW signal in the ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 55. № 5. P. 968–977.
13. Burnett Th.D. Acoustic variability in the ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 56. № 3. P. 817–823.
14. Spindel R.G., Porter R.P., Jaffee R.J. Long-range sound fluctuations with drifting hydrophones // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 56. № 2. P. 440–446.
15. Урик Р. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978.
16. Чупров С.Д., Швачко Р.Ф. Звуковое поле в океане с учетом случайных неоднородностей среды // Акустика океана. М.: Наука, 1974. С. 559–614.
17. Распространение звука во флуктуирующем океане / Под ред. Флатте С. М.: Мир, 1982.
18. Broek H.W. Temporal and spatial fluctuations in single-path underwater acoustic wave fronts. I: Transmission from the first convergence zone at 43-nmi range. II: Transmission over 270-nmi range. III: Transmission over 540-nmi range // J. Acoust. Soc. Amer. 1982. V. 72. № 5. P. 1527–1532, 1533–1537, 1538–1543.
19. DeFerrari H.A., Davis R.I., Nguyen H., Tusting R.F., Williams N.J. Measurements of transmission fluctuations at three ranges for refracted paths through the deep ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1983. V. 74. № 5. P. 1448–1463.
20. Shulkin M., Garrison G.R., Wen T. High-frequency acoustic variability in the Arctic // J. Acoust. Soc. Amer. 1985. V. 77. № 2. P. 465–481.
21. Кравцов Ю.А., Петников В.Г., Шмелев А.Ю. Исследования флуктуаций амплитуды звукового поля на стационарной акустической трассе // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 3. С. 407–409.
22. Бункин Ф.В., Кравцов Ю.А., Омельченко Н.Н. и др. Результаты исследования стабильности звуковых сигналов на стационарных акустических трассах // Акустические волны в океане. М.: Наука, 1987. С. 84–91.
23. Бабий В.И., Бурлакова И.Б., Вировлянский А.А. и др. Стационарная акустическая трасса Крым–Кавказ // Акустика океанической среды. М.: Наука, 1989. С. 75–79.
24. Duda T.F., Flatte S.M., Colosi J.A. et al. Measured wave-front fluctuations in 1000-km pulse propagation in the Pacific Ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1992. V. 92. № 2. Pt. 1. P. 939–955.
25. Борисов Н.Г., Гриценко А.В., Козицкий С.Б. и др. Флуктуации гидроакустических сигналов, обусловленные внутренними волнами // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 5. С. 749–755.
26. Бондарь Л.Ф., Борисов С.В., Гриценко А.В. и др. Результаты исследования флуктуаций интенсивности и фазы низкочастотных акустических сигналов на стационарных трассах в шельфовой зоне Японского моря // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 5. С. 749–755.
27. Чернов Л.А. Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
28. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967.
29. Агеева Н.С., Андреева И.Б., Воловов В.И., Житковский Ю.Ю., Чупров С.Д., Швачко Р.Ф. Океанические характеристики, важные для акустики океана // Акустика океана. М.: Наука, 1974. С. 5–78.
30. Liebermann L. The effect of temperature inhomogeneities in the ocean on the propagation of sound // J. Acoust. Soc. Amer. 1951. V. 23. № 5. P. 563–570.

## Fluctuations of Acoustic Signals in a Sea: the Effect of Refraction

E. P. Gulin and K. I. Malyshev

Amplitude fluctuations of hydroacoustic signals have been studied experimentally in the Black Sea in the frequency range 4–36 kHz. For the winter–spring hydrology conditions characterized by weak sound velocity gradients, the distance-dependent behavior of the coefficients of amplitude variations of direct pulses (having no contacts with the sea surface and the bottom) and pulses reflected from the rough sea surface is obtained. The factors inducing the observed fluctuations are analyzed and the obtained experimental data are explained.