АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VII 1961 Вып. 2

ФЛЮКТУАЦИИ ЗВУКА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В МЕЛКОМ СЛОЕ ВОДЫ

О. С. Тонаканов

Экспериментально исследованы флюктуации амплитуды и разности фаз импульсных звуковых сигналов в двух приемниках в условиях мелкого пресноводного водохранилища (глубина 2—8 *м*) при акустически мягком (илистом) дне. Показано, что флюктуации растут пропорционально амплитуде волны на поверхности. При разнесении двух приемников флюктуации разности фаз увеличиваются и при определенных размерах базы ($\geqslant 1$ *м*) дальнейшего роста флюктуаций не наблюдается. Выяснено, что флюктуации разности фаз и величина логарифма коэффициента вариации амплитуды сигнала убывают приблизительно пропорционально корню 4-й степени из расстояния.

Экспериментальное исследование флюктуаций гидроакустических сигналов представляет определенный интерес как с точки зрения выяснения физических причин, вызывающих эти явления, так и с точки зрения практического применения результатов опытов в различных гидроакустических приборах. В литературе в последние годы опубликован ряд работ, посвященных этому вопросу. В этих работах приводятся результаты исследования рассеяния гидроакустических сигналов (реверберационный сигнал) от свободной поверхности воды [1, 2], измерения флюктуаций интенсивности импульсных сигналов, отраженных водной поверхностью в прямом направлении звука [3, 4]. Экспериментальные данные подвергнуты статистической обработке с целью выяснения законов распределения амплитуд сигнала и величины коэффициента вариации амплитуды отраженного сигнала. В этих работах не найдено явных закономерностей, связывающих величины статистических характеристик сигнала с состоянием водной поверхности. Только в работе [2] показано, что поверхностная реверберация (частота 60 *кгц*) коррелирована со скоростью ветра и наблюдается рост ее уровня с ростом скорости ветра и амплитуды поверхностного волнения при малых значениях этих величин. В работах [3, 5, 6] исследовался объемный сигнал, прошедший прямым путем от излучателя к приемнику, не касаясь поверхности воды. Полученные в этих работах опытные данные сопоставлялись с температурными флюктуациями среды. Теоретические расчеты в этих случаях базировались на работах Минтцера [7—9] по распространению звука в статистически неоднородной среде. Показано, что в большинстве случаев квадрат коэффициента вариации амплитуды сигнала линейно возрастает с ростом расстояния между излучателем и приемником. Абсолютная величина коэффициента вариации зависит от интенсивности температурных флюктуаций. В работах [10, 11] исследуются флюктуации разности фаз и амплитуды сигнала в зависимости от амплитуды поверхностного волнения при различных частотах сигнала. Выявлена корреляция между флюктуациями сигнала и поверхностным волнением.

В настоящей работе излагаются материалы наблюдений флюктуаций амплитуды и разности фаз гидроакустических импульсов, распространяющихся в слое воды, ограниченном дном и свободной поверхностью акватории. Измерения были проведены в условиях пресноводного водохранилища с акустически мягким грунтом. В эксперименте использовались гидро-

акустические импульсы продолжительностью в 50 *мсек* при глубинах водного слоя 2 *м* и 8 *м*, поэтому принимаемый сигнал имел сложный интерференционный характер, который определялся одно- и многократным отражениями от дна и свободной поверхности акватории. Выбор длительности импульса определился из условия разделения интересующего нас сигнала, представляющего собой интерференцию прямого и одно- и многократно отраженных от дна и поверхности сигналов, от сигналов, отраженных береговой полосой водохранилища. Фиксируя амплитуду и разность фаз в каждом импульсе и проведя затем статистическую обработку результатов наблюдений, можно было сделать определенные заключения о зависимости величины коэффициента вариации амплитуды сигнала η и среднеквадратичной величины флюктуации разности фаз σ_φ от состояния водной поверхности, частоты сигнала и расстояния между излучателем и приемной системой, а также от разнесения приемников (для разности фаз).

Флюктуации гидроакустических сигналов в водных средах вызываются в основном двумя причинами: влиянием свободной поверхности воды и наличием статистической неоднородности среды, обязанной своим происхождением главным образом температурным неоднородностям. Поскольку при экспериментах мы имели дело со сложным интерференционным сигналом, то необходимо дать оценку влияния температурных неоднородностей среды. Условия проведения опытов были близки к изотермическим, и измеренная флюктуация температуры имела величину порядка 0,005—0,01°. Оценка, произведенная на основе работ Чернова [12], показывает, что флюктуационный добавок, определяемый температурными неоднородностями, значительно меньше величин, наблюдавшихся на опыте; это позволяет заключить, что основные эффекты, полученные в процессе проведения экспериментов, связаны с влиянием свободной поверхности акватории.

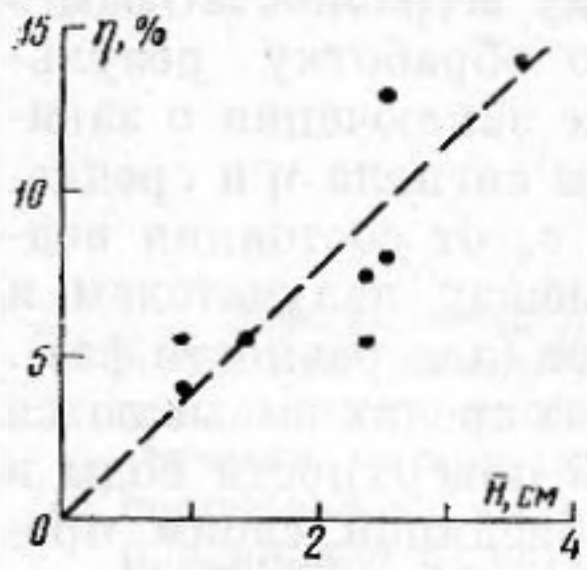
Передающий (излучающий) тракт включал в себя импульсный генератор с диапазоном частот от 5 до 25 *кгц* при длительности импульса 50 *мсек* и частоте повторения 2 *гц*. Цилиндрические излучатели с широкой диаграммой направленности в вертикальной плоскости устанавливались на металлических опорах на половине глубины в месте проведения работ.

Приемный тракт, на котором измерялись флюктуации разности фаз и амплитуды импульсов, включал в себя донную приемную базу, несущую на себе 5 однотипных гидрофонов, которые были расположены в линию в горизонтальном направлении на различных расстояниях друг от друга. База была ориентирована в направлении на излучатель таким образом, что разность хода к любым парам гидрофонов была минимальной. Гидрофоны располагались на расстоянии 2 *м* от дна, при глубине водохранилища 8 *м*, и на половине глубины при проведении опытов на двухметровой глубине. В процессе измерений можно было использовать любую пару гидрофонов, варьируя тем самым расстояние между гидрофонами. Двухканальная электронная аппаратура позволяла измерять разность фаз от 0 до 2 π с точностью отсчета разности хода 1,5 *мм* и флюктуации амплитуды сигнала с точностью 2—3%.

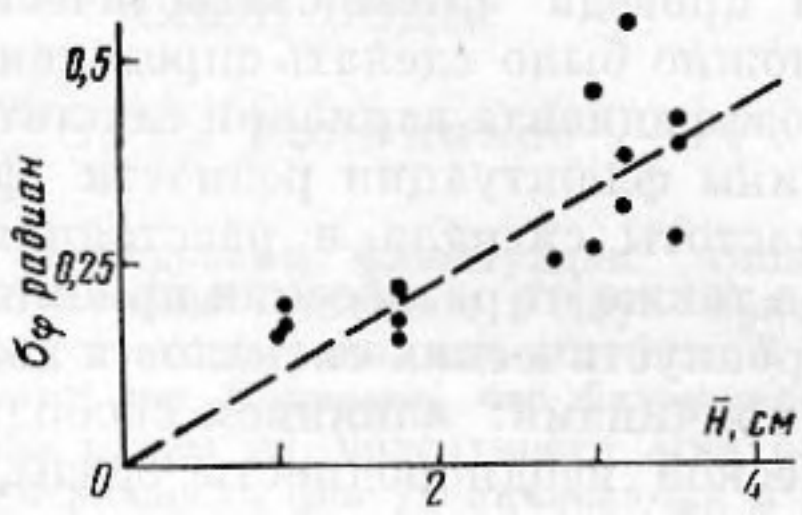
Статистическая обработка экспериментальных результатов заключалась в определении величин относительной флюктуации амплитуды (коэффициента вариации) и флюктуации разности фаз звука по записям дискретных сигналов на фотопленке. Флюктуации разности фаз определялись как среднеквадратичное отклонение дискретной случайной величины от среднего ее значения в каждой исследуемой серии импульсов. Для каждого эксперимента на механическом корреляторе вычислялась среднеквадратичная амплитуда поверхностной волны по записям на шлейфовом осциллографе. Регистрация волнения производилась специальными волнографами [10, 11]. Продолжительность одного эксперимента составляла 2—3 *мин*, что позволило получать интересующие нас характеристики флюктуаций с точностью, определяемой аппаратурной погрешностью.

При увеличении времени анализа (опыта) изменения величины флюктуаций звука почти не наблюдалось.

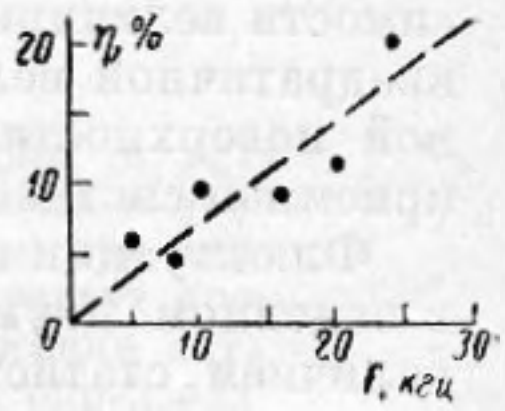
Анализ величин флюктуаций разности фаз и амплитуды звукового сигнала при различной амплитуде волны на поверхности показал наличие вполне определенной связи между флюктуациями сигнала и высотой поверхностного волнения. На фиг. 1 и 2 показаны соответственно зависимость коэффициента вариации амплитуды сигнала η и среднеквадратичной



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

флюктуации разности фаз σ_φ от высоты волны на поверхности $\overline{H}$. Измерения были проведены при частоте заполнения гидроакустических импульсов $f = 9{,}7$ *кгц* при глубине водного слоя $h = 8$ *м* и расстоянии между приемниками и излучателем $L = 120$ *м*. При наблюдавшихся амплитудах поверхностного волнения легко видеть пропорциональный рост коэффициента вариации и флюктуаций разности фаз с ростом высоты волны. Пунктирные прямые построены по методу наименьших квадратов (фиг. 1, 2 и 3).

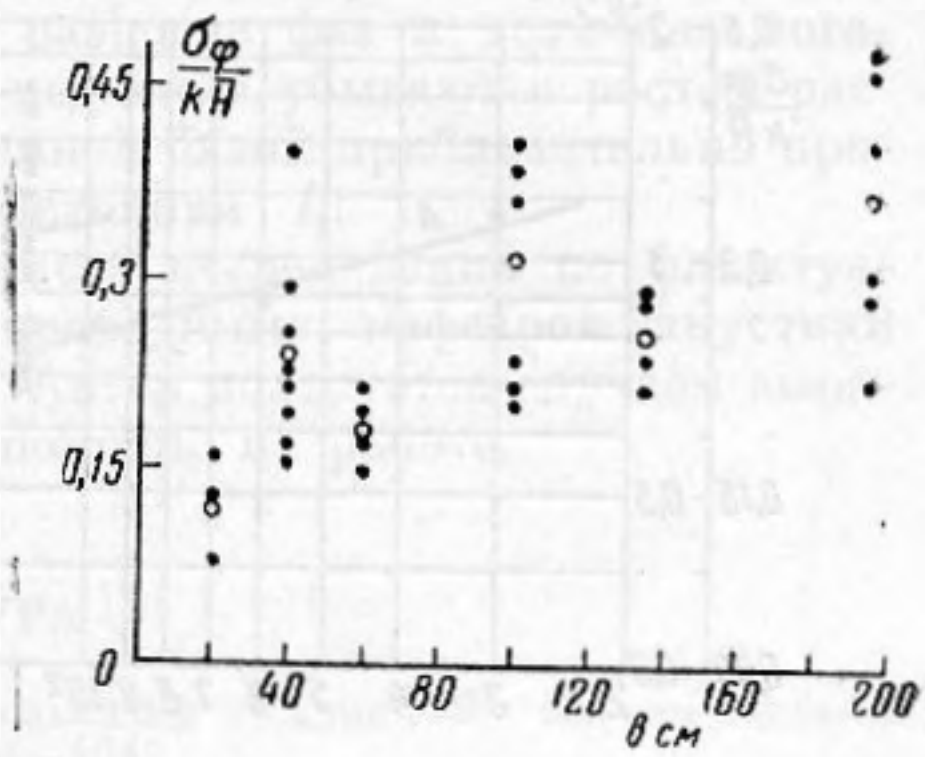
Измерения коэффициента вариации η при постоянном волнении поверхности $\overline{H} = 5$ *см* (везде имеются в виду среднеквадратичные величины) и при различной частоте сигнала f в диапазоне частот от 5 до 25 *кгц* показали линейный рост коэффициента вариации η с ростом частоты сигнала f, как это следует из рассмотрения фиг. 3. Измерения были проведены при глубине $h=2$*м* и расстоянии между излучателем и приемником $L = 60$ *м*. Излучатель и приемник были расположены на половине глубины.

Наблюдаемый разброс экспериментальных результатов не является неожиданным, поскольку флюктуационные явления при распространении звука в слое воды нельзя считать совершенно ясными и можно сделать лишь предварительные заключения о выявляемых закономерностях. Этот разброс связан, по-видимому, с недостаточностью характеристики свойств водной поверхности путем регистрации только амплитуды волны в одной точке поверхности. Более чистые результаты по флюктуациям звука наблюдались бы при учете как амплитуды, так и формы поверхностного волнения, т. е. при одновременном анализе как корреляционных функций, описывающих свободную поверхность воды, так и амплитуды волнения. Различная степень насыщенности приповерхностных слоев воды газовыми пузырьками и микроорганизмами при проведении измерений в разные дни также должна приводить к дополнительному нерегулярному разбросу флюктуаций.

Результаты эксперимента, представленные на фиг. 1 и 3, являются в некотором смысле слова эквивалентными, поскольку нерегулярная часть принимаемого сигнала, вызванная рассеянием от неровной поверхности воды, зависит от соотношения между амплитудой волнения $\overline{H}$ и λ — длиной волны звука, причем при постоянном волнении $\overline{H}$ с ростом частоты увеличивается нерегулярная часть отражения, а при постоянной частоте (длине волны звука λ) нерегулярная компонента отраженного сигнала будет расти с ростом высоты волны $\overline{H}$, как это следует из [11]. Линейный

рост коэффициента вариации и среднеквадратичной флюктуации разности фаз с увеличением амплитуды поверхностного волнения наблюдался в непрерывном режиме излучения в работе [10].

Очевидно, что пропорциональность между высотой волны $\overline{H}$, с одной стороны, и η и σ_φ, с другой, на определенном этапе роста $\overline{H}$ должна нарушиться (имеется в виду, что расстояние между излучателем и приемниками L остается постоянным). Это возможно в том случае, если на каком-либо участке поверхности между излучателем и приемником будет наблюдаться диффузное рассеяние (участки за излучателем и приемником в расчет не принимаются), в результате на этом участке дальнейший рост нерегулярной составляющей отраженного сигнала не будет наблюдаться при дальнейшем увеличении высоты волны, и тем самым нарушится линейная зависимость η и σ_φ от амплитуды волны на поверхности. Величина «насыщения» η и σ_φ в этих условиях будет определяться соотношением амплитуд прямого (регулярного) сигнала и флюктуирующей частью рассеянного сигнала. В этом случае будем иметь насыщение за счет диффузности отражения, что и было обнаружено в работе [11]. Кроме того, можно предположить такой случай, когда наступает затенение неровностей; при этом возникают участки поверхности, куда не проникает прямой звук. Этот эффект также приведет к нарушению пропорциональности между $\overline{H}$ и η и σ_φ при частотах, для которых еще нет диффузного отражения. В этом случае будет играть роль звук, дифрагированный в область тени и обратно, и его наложение на обычное геометрическое отражение.

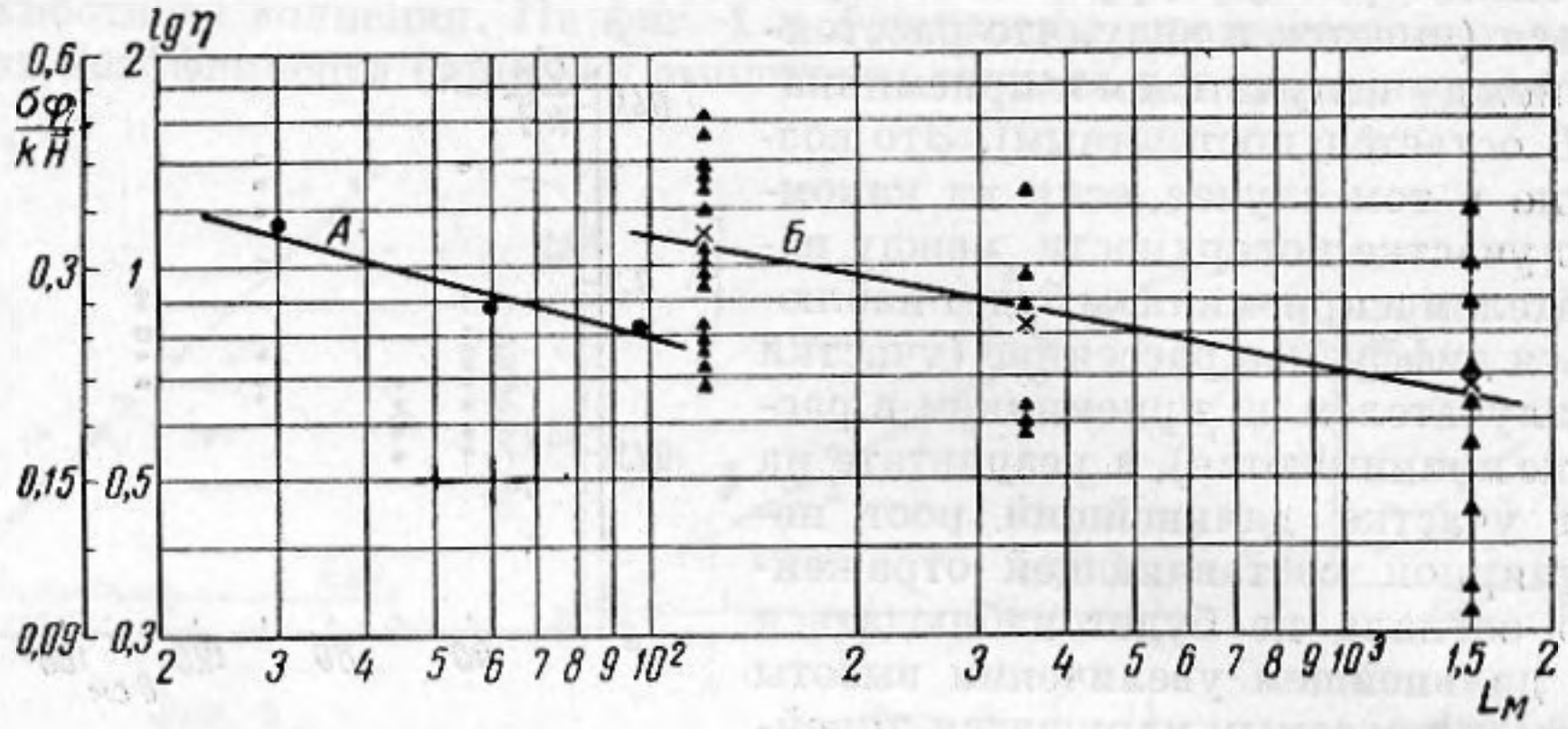


Фиг. 4

Основываясь на линейной зависимости между флюктуациями разности фаз и высотой волны $\overline{H}$ в определенных пределах ее изменения, наблюдавшийся в эксперименте, можно провести своего рода нормировку флюктуаций, приведя их к единичному волнению, для чего следует взять отношение $\sigma_\varphi/k\overline{H}$, где k — волновое число звука, $\overline{H}$ — высота волны на поверхности акватории, соответствующая флюктуации разности фаз σ_φ. В этих нормированных безразмерных единицах на фиг. 4 представлена зависимость флюктуации разности фаз от расстояния между гидрофонами. Измерения проведены на расстоянии между излучателем и приемной базой $L = 120$ *м* при глубине слоя воды $h = 8$ *м* на частоте $f = 9{,}7$ *кгц*. Черные кружки соответствуют измерениям, проведенным в различных условиях; средние значения флюктуаций на выбранном расстоянии между гидрофонами отмечены светлыми кружками. Характер зависимости показывает, что наблюдается рост флюктуаций разности фаз с увеличением расстояния между приемниками, т. е. корреляция сигналов на гидрофонах падает с ростом расстояния между ними. При размере базы $b \geqslant 1$ *м* рост флюктуаций в значительной мере прекращается и величина $\sigma_\varphi/k\overline{H}$ остается примерно постоянной. Тонкую структуру зависимости флюктуаций разности фаз в функции расстояния между приемниками можно анализировать только, сопоставляя функцию взаимной корреляции двух точек на поверхности акватории и соответствующую ей взаимную корреляцию флюктуаций разности фаз при различном расстоянии между гидрофонами. Некоторые данные на этот счет содержатся в [10].

Выяснение зависимости флюктуаций гидроакустических импульсов от расстояния между приемной базой и источником звука представляет существенный интерес. Эксперимент был проведен на расстояниях до

1,5 *км*. Измерения были проведены на частотах 10,5 *кгц* (амплитудные измерения) и 9,7 *кгц* (фазовые). Результаты приведены на фиг. 5, где в двойном логарифмическом масштабе показана зависимость логарифма коэффициента вариации амплитуды принимаемого сигнала $\lg \eta$ (измерения при постоянном волнении) и безразмерной среднеквадратичной величины



Фиг. 5

флюктуаций разности фаз $\sigma_\varphi/k\overline{H}$, приведенной к единичному волнению поверхности акватории. Амплитудные измерения были проведены на расстояниях от источника звука до приемной базы, равных 30, 60 и 95 *м*. Прямая *А* проведена по экспериментальным значениям $\lg \eta$ на указанных выше расстояниях L. Треугольниками обозначены величины $\sigma_\varphi/k\overline{H}$ для серий экспериментов, проведенных в разные дни и при различной волне на поверхности акватории. Прямая *Б* проведена по средним значениям флюктуаций разности фаз на каждом из исследованных расстояний L (120, 350 и 1500 *м*). Средние величины фазовых флюктуаций отмечены крестиками. База между гидрофонами составляла величину от 1 до 2 *м*; в этом случае фазовые флюктуации мало изменяются при изменении размера базы b. Это позволило иметь бо́льшую информацию о фазовых флюктуациях на выбранных расстояниях L.

В выбранном масштабе флюктуации сигналов падают с ростом расстояния L по линейному закону, что свидетельствует о степенной зависимости флюктуаций от расстояния. Наклон прямых на фиг. 5, определяющий показатель степенной функции, по которой происходит затухание флюктуаций с ростом L, оказывается весьма близким друг к другу; так, для логарифма коэффициента вариации имеем зависимость $\lg \eta \sim (L)^{-0,28}$, для средних значений фазовых флюктуаций $\sigma_\varphi / k\overline{H} \sim (L)^{-0,23}$. Расчет, проведенный по экспериментальным данным для убывания фазовых флюктуаций с расстоянием L при постоянной амплитуде волны на поверхности акватории $\overline{H} = \text{const}$, показывает, что в этом случае флюктуации разности фаз убывают пропорционально $(L)^{-0,27}$. С тем, чтобы не загромождать фиг. 5, эта прямая на фигуре не нанесена. Как легко видеть, среднее значение показателя затухания (в предположении одинаковости затухания $\lg \eta$ и $\sigma_\varphi / k\overline{H}$ с расстоянием L) весьма близко к 1/4, что соответствует убыванию флюктуаций пропорционально корню 4-й степени из расстояния. Этот факт является экспериментальным, и обосновать его теоретически пока не удалось.

Подводя краткие итоги по экспериментальным материалам, можно сделать следующие заключения о характере флюктуаций гидроакустических сигналов, вызываемых неровной поверхностью воды, для случая мелководной акватории: а) в определенных пределах изменения амплитуды поверхностной волны наблюдается линейная зависимость между высотой

поверхностной волны $\overline{H}$ и коэффициентом вариации амплитуды звукового сигнала η, а также между высотой поверхностной волны и флюктуациями разности фаз σ_φ; б) флюктуации разности фаз возрастают пропорционально расстоянию между приемниками, пока это расстояние (b) не превышает 1 *м*, и при размерах базы $b \geqslant 1$ *м* флюктуации остаются почти постоянными. Область роста флюктуаций лежит в пределах радиуса корреляции поверхностного волнения; в) флюктуации разности фаз и величина логарифма коэффициента вариации сигнала медленно убывают с ростом расстояния между источником звука и приемной базой приблизительно пропорционально корню 4-й степени из расстояния L.

Данная работа представляет собой часть исследований по флюктуационным явлениям в водных средах, проводимых кафедрой акустики МГУ под руководством С. Н. Ржевкина. Автор пользуется случаем выразить благодарность руководителю за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. J. Urick, R. M. Hoover. Backscattering of sound for the sea surface. J. Acoust. Soc. America, 1956, 28, 6, 1038—1042.
2. G. R. Garrison, S. R. Murpfy, D. S. Potter. Measuments of the backscattering of underwater sound from the sea surface. J. Acoust. Soc. America, 1960, 32, 1, 104—111.
3. D. C. Whitmarsh, E. Skudrzyk, R. J. Urick. Forward scattering of sound in the sea and its correlation with the temperature microstructure. J. Acoust. Soc. America, 1957, 29, 10, 1124—1143.
4. M. J. Pollak. Surface reflection of sound at 100 kc. J. Acoust. Soc. America, 1958, 30, 4, 343—347.
5. J. N. Nanda, V. N. Rao. Fluctuation of sound pulses transmitted vertically in the sea. J. Acoust. Soc. America, 1958, 30, 7, 639—641.
6. F. H. Sagar. Acoustic intensity fluctuation and temperature Microstructure in the sea. J. Acoust. Soc. America, 1960, 32, 1, 112—121.
7. D. Mintzer. Wave propagation in a randomby inhomogeneous medium I. J. Acoust. Soc. America, 1953, 25, 5, 922—927.
8. D. Mintzer. Wave propagation in a randomly inhomogeneous medium. II. J. Acoust. Soc. America, 1953, 25, 6, 1107—1111.
9. D. Mintzer. Wave propagation in a randomly inhomogeneous medium. III. J. Acoust. Soc. America, 1954, 26, 2, 186—190.
10. Л. Н. Захаров. Распространение тональных сигналов в плоском слое воды с волнующейся поверхностью. Акуст. ж., 1960, 6, 4, 454—461.
11. Г. Е. Смирнов, О. С. Тонаканов. Флюктуации импульсных гидроакустических сигналов при отражении от поверхности при наличии волнения. Акуст. ж., 1960, 6, 4, 482—490.
12. Л. А. Чернов. Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. М., Изд-во АН СССР, 1958, стр. 72—80.

Кафедра акустики
Московского государственного университета

Поступила в редакцию
19 сентября 1960 г.