АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том V 1959 Вып. 2

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСА В ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ

Н. С. Агеева

В работе проводится анализ формы сигнала при распространении звукового импульса в подводном звуковом канале путем сопоставления записи сигнала с лучевой картиной, соответствующей условиям опыта.

В работе [1] было показано, что при исследовании распространения звука в подводном звуковом канале во многих случаях целесообразно пользоваться лучевыми представлениями, которые приводят к результатам, подтверждающимся данными опыта. При исследовании распространения взрывного импульса в подводном канале [1, 2] на больших расстояних (сотни километров) наблюдалось затягивание сигнала, которое хорошо объяснялось лучевой теорией, как следствие различия времен прихода звука по различным лучам.

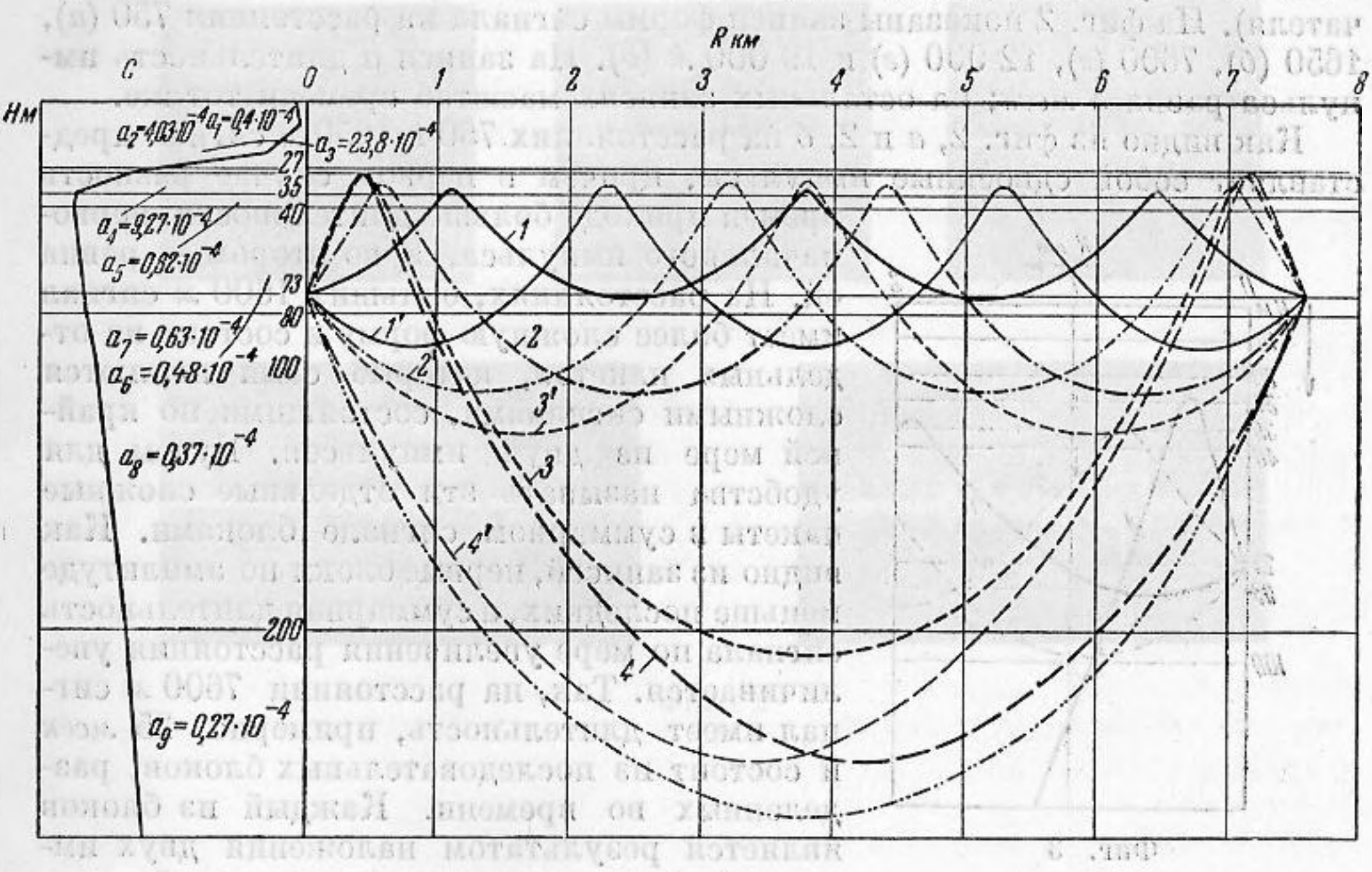
В настоящей работе для детального анализа формы звукового сигнала при исследовании распространения в подводном канале на меньших дистанциях (до 20 *км*) был использован ультразвуковой импульс прямоугольной формы малой длительности (3 *мсек*). На записях было обнаружено сильное изменение формы импульса с изменением расстояния от излучателя. Сигнал имел вид сдвоенных, строенных импульсов, подобных первоначальному, а на больших расстояниях сигнал принимал еще более сложную форму.

Для подробного исследования формы сигнала был проведен расчет звуковых лучей, соответствовавших условиям опыта. Рассчитывалась разность времен прихода импульсов в точку приема по различным лучам, выходящим из излучателя под соответственными углами. Вычислялись также амплитуды импульсов, пришедших по каждому лучу, причем учитывались два фактора, влияющие на амплитуду: фактор фокусировки и диаграмма направленности излучателя. Результаты вычисления разности времен прихода и амплитуд импульсов сопоставлялись с записями формы сигналов. Обнаружено хорошее согласие расчета с экспериментом.

Распределение скорости звука по глубине во время одного из опытов показано на фиг. 1 слева. Здесь реальная кривая распределения скорости звука по глубине заменена ломаной кривой, образованной прямолинейными участками. Разбиение кривой на участки производилось таким образом, чтобы на каждом из участков постоянный градиент скорости $a = \Delta c/cH$, где H — высота слоя с постоянным градиентом, мало отличался от градиента $1/c \cdot dc/dh$. Запись сигнала осуществлялась на кинопленку при помощи фоторегистратора, представляющего собой сочетание осциллоскопа с кинокамерой.

Для примера в настоящей работе проведен анализ формы сигнала для трех расстояний: 750 *м*, 1650 *м* и 7600 *м*. На фиг. 1 представлен результат расчета всех возможных лучей, приходящих в точку приема на расстоянии 7600 *м* от излучателя, для случая, когда приемник и излучатель находятся на одинаковой глубине. В точку приема приходят лучи, имеющие целое число циклов. В данном случае таких лучей оказалось девять. В общем случае несимметричного канала, т. е. когда кривая распределения скорости несимметрична относительно оси канала, и если излучатель и приемник расположены на одном горизонте, имеет место следующая кар-

тина лучей. Для заданного расстояния точки приема от излучателя найдутся пары лучей с четным числом циклов, вышедшие под равными углами вверх и вниз от горизонтальной плоскости и проходящие равные пути в равные интервалы времени. Однако эти лучи проходят через разные участки пространства. На фиг. 1 такие пары лучей обозначены 2—2′ и 4—4′. При нечетном числе циклов такие пары лучей будут существовать только



Фиг. 1

в случае симметричного канала. В случае несимметричного канала верхний и нижний лучи с одинаковым нечетным числом циклов будут иметь неравные времена прихода сигнала, кроме того, углы выхода верхнего и нижнего лучей такой пары также будут неравны. Пары лучей с нечетным числом циклов обозначены цифрами 1 и 1′, 3 и 3′. Луч 5 не имеет парного луча.

В соответствии с приведенной картиной лучей, сигналы, пришедшие в точку приема по лучам каждой пары с четным числом циклов, должны быть равны по фазе и по амплитуде. Если разность времен пробега импульса по двум ближайшим друг к другу лучам больше длительности посылаемого импульса, то на пленке будет записан сигнал, состоящий из отдельных, следующих друг за другом импульсов, соответствующих отдельным лучам или парам лучей. При разности времен прихода, меньшей длительности импульса, произойдет наложение импульсов, которое может дать либо полную, либо частичную интерференцию, в зависимости от соотношения между разностью времен и длительностью импульса.

Разность времен пробега двух лучей на расстоянии R, вышедших под разными углами α_0 и α'_0 приближенно определяется выражением:

$$\Delta T = \frac{R}{c_0}\left(\frac{\alpha_0^2-\alpha_0'^2}{2}+A_1-A\right),$$

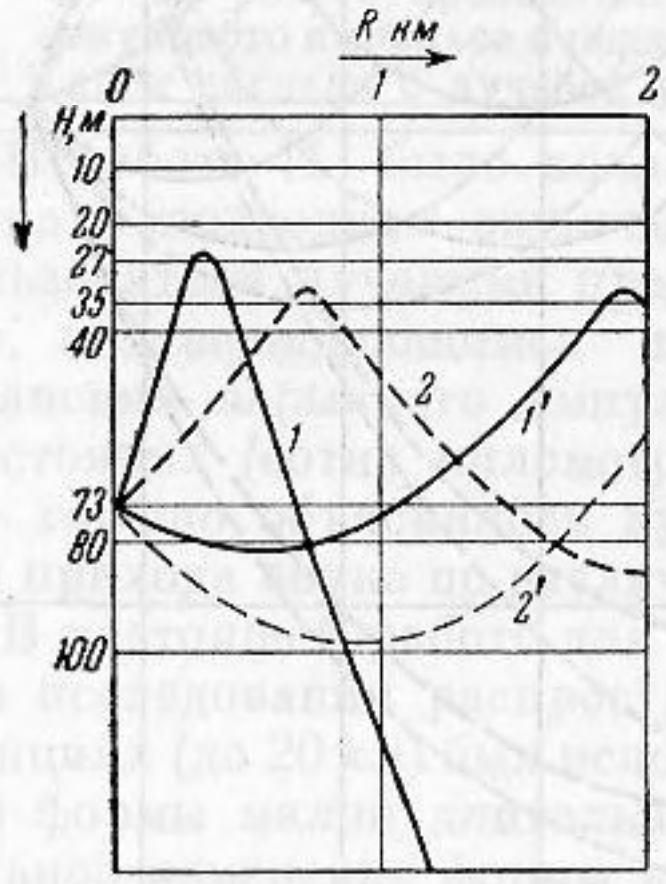
которое получается из точного выражения $t=\frac{1}{a_i c_0}\int\limits_{\alpha_i}^{\alpha_{i+1}}\frac{d\alpha}{\cos\alpha}$. При этом

$$A=\sum_1^i\frac{R_i}{R}\,\frac{\alpha_i^2+\alpha_{i+1}^2+\alpha_i\alpha_{i+1}}{3};\quad A_1=\sum_1^n\frac{R_n}{R}\,\frac{\alpha_n^2+\alpha_{n+1}^2+\alpha_n\alpha_{n+1}}{3},$$

где i и n — номера слоев с постоянным градиентом соответственно для лучей α_0 и α_0', R_i и R_n — горизонтальные проекции отрезков лучей в соответственных слоях i и n, c_0 — скорость звука на горизонте излучателя.

Были проанализированы записи формы сигнала на различных расстояниях от излучателя (приемник был расположен на 7—8 *м* ниже оси излучателя). На фиг. 2 показаны записи формы сигнала на расстояния 750 (*а*), 1650 (*б*), 7600 (*в*), 12 000 (*г*) и 19 000 *м* (*д*). На записи *а* длительность импульса равна 3 *мсек*; на остальных записях масштаб времени тот же.

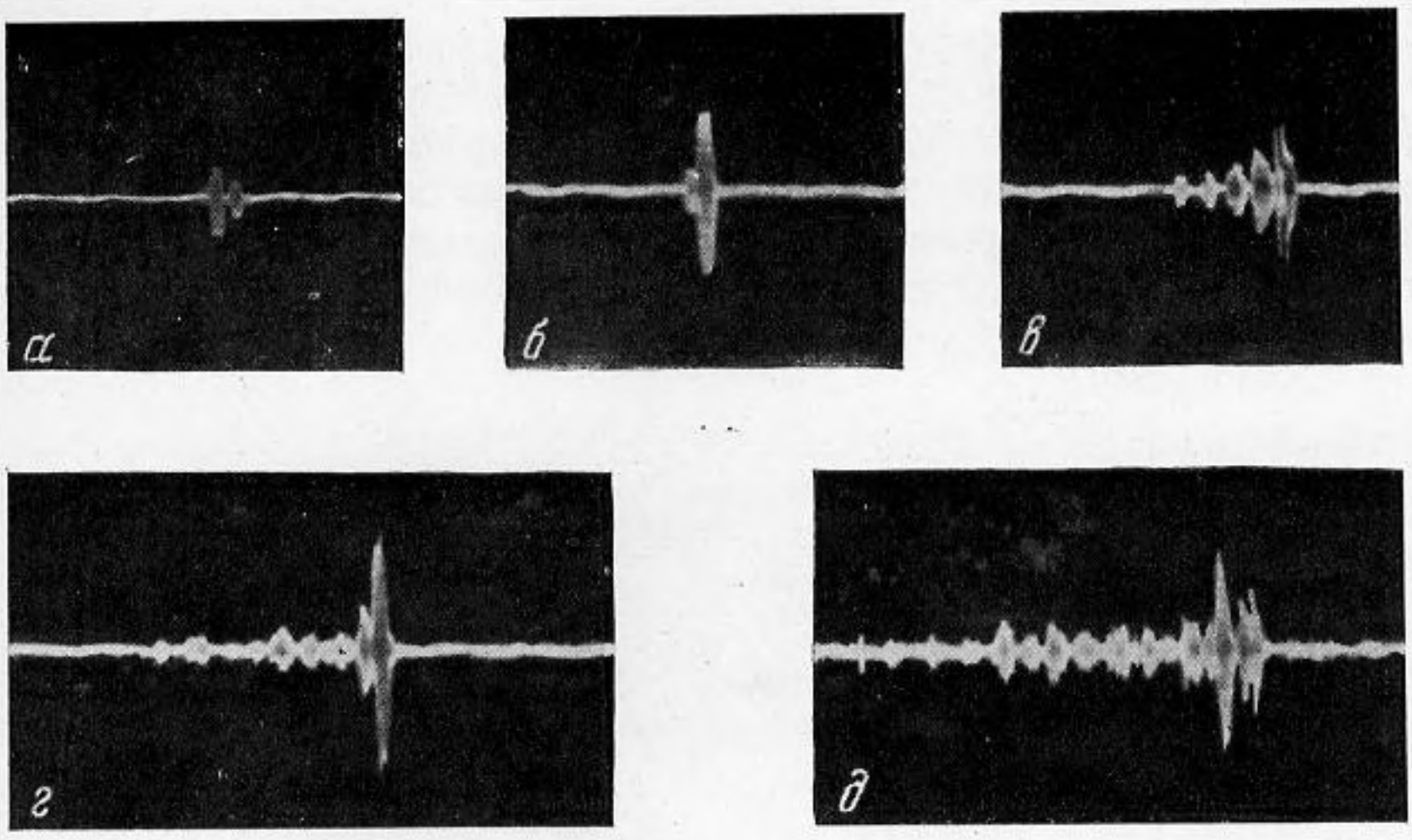
Как видно из фиг. 2, *а* и 2, *б* на расстояниях 750 и 1650 *м* сигнал представляет собой сдвоенные импульсы, причем в первом случае разность времен прихода больше длительности первоначального импульса, а во втором — равна ей. На расстояниях, больших 1600 *м* сигнал имеет более сложную форму и состоит из отдельных пакетов, которые сами являются сложными сигналами, состоящими по крайней мере из двух импульсов. Будем для удобства называть эти отдельные сложные пакеты в суммарном сигнале блоками. Как видно из записей, первые блоки по амплитуде меньше последних, а суммарная длительность сигнала по мере увеличения расстояния увеличивается. Так, на расстоянии 7600 *м* сигнал имеет длительность, примерно, 25 *мсек* и состоит из последовательных блоков, разделенных во времени. Каждый из блоков является результатом наложения двух импульсов, соответствующих паре лучей.



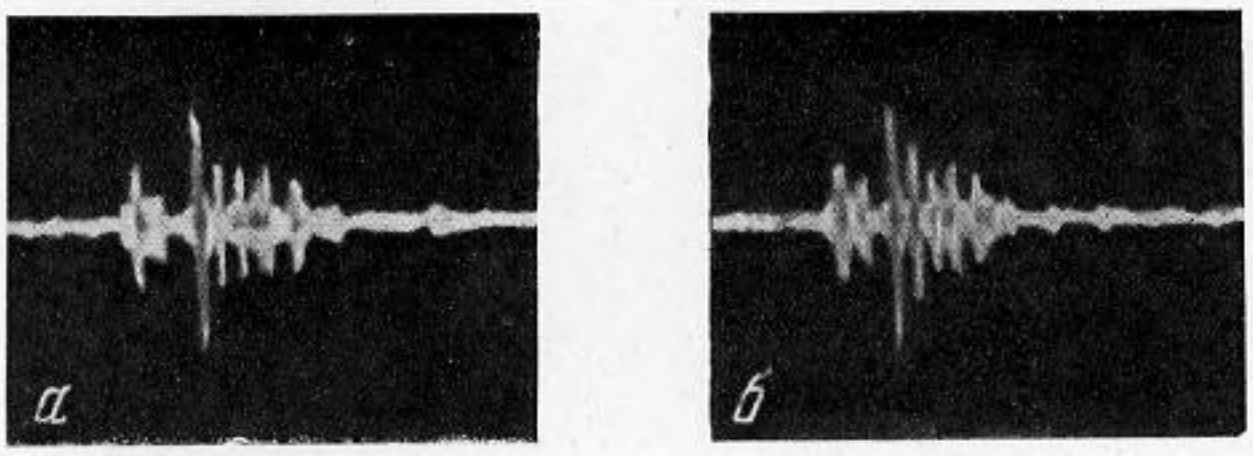
Фиг. 3

Для анализа формы сигнала на малых расстояниях — 750 *м* и 1650 *м* — воспользуемся картиной звуковых лучей для этих расстояний, показанной на фиг. 3. Легко видеть, что в точки 750 *м* и 1650 *м* приходят только по два возможных луча, соответственно, 1 и 1′ и 2 и 2′, вышедших под различными углами вверх и вниз от горизонта излучателя. Для расстояния 750 *м* первый импульс, соответствующий нижнему лучу 1′, вышедшему под меньшим углом, придет раньше второго, соответствующего лучу 1, и по амплитуде будет большим, как показывает учет фактора фокусировки и диаграммы направленности. В точку 1650 *м* приходят импульсы первый, соответствующий нижнему лучу 2′, вышедшему под бо́льшим углом, и второй, соответствующий верхнему лучу 2, с меньшим углом выхода. Причины различия амплитуд импульсов те же, что и для точки 750 *м*.

Для объяснения формы сигнала на расстоянии 7600 *м* воспользуемся картиной звуковых лучей, приведенной на фиг. 1. Так как в опыте приемник находился на 7—8 *м* ниже горизонта излучателя, то соответствующая этим условиям картина звуковых лучей несколько отличается от картины, изображенной на фиг. 1, на которой точки приема лежат на горизонте излучателя. В результате расчета времени прихода сигналов по различным лучам было выяснено, что первым должен прийти импульс по лучу 5 и последним — по лучу 1. Следует заметить, что поскольку в рассматриваемом случае приемник не находился на оси излучателя, то в паре лучей с четным числом циклов времена прихода по обоим лучам не равны. Однако, вследствие малого различия в глубинах расположения приемника и излучателя соответствующие импульсы практически приходят в точку приема лишь с небольшим сдвигом по фазе, который нельзя заметить на записи. Разность времен прихода между лучами каждой пары меньше длительности посылки, поэтому на записи отдельные импульсы в блоке являются результатом интерференции двух импульсов, соответствующих двум лучам каждой пары, а так как разности хода между последовательными бло-



Фиг. 2



Фиг. 4

ками, соответствующими лучу 5, парам лучей 4 и 4′, 3 и 3′, 2 и 2′, 1 и 1′, больше длительности импульса, то все блоки в этом сложном сигнале разделены во времени.

Экспериментальные и расчетные данные для расстояний 750 *м*, 1650 *м* и 7600 *м* сведены в таблицу, в которой показаны значения разности времен прихода двух импульсов по соответственным лучам и отношение амплитуд импульсов. Для расстояния 7600 *м* расчетная разность времен дана по отношению ко времени прихода импульса соответствующего лучу 5. Экспериментальные данные относятся, для расстояния 7600 *м*, к импульсам-блокам, соответствующим парам лучей. Для лучей 1, 2, 3 и 4 вычислялись разности времен, соответствующих лучам каждой пары.

В таблице эти разности представлены в виде поправок ко времени прихода лучей, обозначенных штрихами. Экспериментальные значения времен прихода и амплитуд даны для импульсов-блоков каждой пары лучей, а не для отдельных лучей.

Таблица

Расстояние в *м*	№ луча	Угол выхода луча в *рад* α_0	Разность времени прихода сигнала в *м сек*		Отношение амплитуд			
					расчетн.			эксперимент. отнош. амплитуд блоков
			расчетн.	эксперимент.	диагр. направл. $\frac{D'}{D}$	фактор фокусир. $\sqrt{\frac{f'}{f}}$	отнош. амплитуд импульсов	
750	1	$15{,}50\cdot10^{-2}$	0	0	1	1	1	1
	1′	$2{,}90\cdot10^{-2}$	—4,8	—4,5	4	0,89	3,5	2,5
1650	2′	$5{,}5\cdot10^{-2}$	0	0	1	1	1	1
	2	$4{,}15\cdot10^{-2}$	+2,6	+3	1,25	1,56	2,0	3,7
7600	5	$12{,}35\cdot10^{-2}$	0	0	1	1	1	1
	4′	$11{,}4\cdot10^{-2}$	8,5	7	1,1	1,08	1,2	1,4
	4	$11{,}5\cdot10^{-2}$	8,5+0,36		0,75	1,06	0,8	
	3′	$7{,}2\cdot10^{-2}$	16,5	14,5	2	1,16	2,3	1,9
	3	$10{,}5\cdot10^{-2}$	16,5—0,5		0,8	0,85	0,68	
	2′	$6{,}2\cdot10^{-2}$	21	21	2,5	1,15	2,9	
	2	$6{,}4\cdot10^{-2}$	21—0,26		2	1,17	2,3	3
	1′	$5{,}15\cdot10^{-2}$	22,5		2,9	2	5,8	
	1	$3{,}10\cdot10^{-2}$	22,5+2,7	27	2,9	4	11,5	5

Как видно из таблицы, экспериментальные данные подтверждаются расчетом как по разности времен прихода импульсов, так и по амплитуде, причем для времени прихода согласие между расчетом и экспериментом лучше, чем для амплитуд.

До сих пор мы рассматривали случай расположения приемника вблизи горизонта излучателя. При этом на больших расстояниях, когда в точку приема приходит больше двух лучей, наблюдается следующая закономерность: чем меньше угол выхода луча, тем позже он приходит и тем больше его амплитуда. Совершенно другая закономерность изменения амплитуд импульсов обнаруживается при рассмотрении записей сигналов в зоне геометрической тени выше горизонта излучателя. Если бы приемник находился в зоне прямого звука на значительном расстоянии от горизонта излучателя, то соотношения амплитуд и времен прихода отдельных импульсов определялись бы, согласно известной формуле для фактора фокусировки, не только углами выхода лучей из источника, но и углами прихода лучей в точку приема, зависящими от расстояния приемника от горизонта излучателя. В этом случае раньше может прийти луч, вышедший под меньшим углом и, следовательно, имеющий большую амплитуду.

Рассмотрение формы сигнала при расположении приемника в зоне геометрической тени выше горизонта излучателя, по-видимому, можно свести к рассмотрению сигнала, образованного путем пересечения в точке приема продолжений звуковых фронтов, распространяющихся вдоль различных лучей, предполагая, что амплитуда звука вдоль фронта спадает по некоторому закону *. Здесь амплитуда отдельного импульса в суммарном сигнале определяется расстоянием точки приема от соответствующего луча, отсчитываемым по фронту, и от амплитуды сигнала, соответствующего этому лучу. Следовательно, кроме фактора фокусировки, фронт которого проходит через точку приема, амплитуда будет зависеть еще и от расстояния луча по фронту до точки приема. Для примера на фиг. 4, *а*, *б* показана запись сигнала на расстоянии 14 000 *м* на глубине 25 *м* в зоне геометрической тени. Как видно из фигуры, сигнал отличается по форме от сигналов на горизонте излучателя в смысле соотношения амплитуд отдельных блоков.

Следует также остановиться на вопросе о флюктуациях сигнала. Анализируя форму сигнала на различных расстояниях от излучателя и сопоставляя ее с картиной звуковых лучей для рассматриваемого случая распределения скорости звука по глубине, можно было заметить, что сигнал, образованный лучами, не касающимися поверхности моря, флюктуирует слабо. На фиг. 4, *а*, *б* для примера показаны два сигнала, записанные в одной точке через 15 *сек*. Они мало различаются. Устойчивость в течение продолжительного времени сигнала такой сложной формы указывает, что слабо флюктуирует не только амплитуда, но и фаза сигнала. Как уже указывалось в литературе [3] и как подтвердилось в настоящих опытах, при рассмотрении звукового сигнала, отраженного от поверхности воды, обычно обнаруживается значительное изменение сигнала по амплитуде и по фазе даже за более короткое время. Слабая флюктуация сигнала в случае, к которому относятся записи фиг. 4, *а*, *б*, указывает на то, что, по-видимому, влияние объемных неоднородностей среды на флюктуации сигнала незначительно. Однако этот вопрос требует более тщательной проверки.

В заключение приношу благодарность Н. В. Студеничнику и С. М. Горскому, проводившим измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Бреховских. Волны в слоистых средах. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1957, стр. 421—458.
2. Л. Д. Розенберг. Об одном новом явлении в гидроакустике. Докл. АН СССР, 1949, 69, 175.
3. F. H. Sogar. Fluctuations in intensity of short pulses of 14.5kc sound received from a source in the sea. J. Acoust. Soc. America, 1955, 27, 6, 1092—1096.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
25 января 1958 г.

* Подобные представления высказывались Г. Д. Малюжинцем.