АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XIX 1973 Вып. 6

УДК 534.222

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В НЕОДНОРОДНОМ ПРИПОВЕРХНОСТНОМ КАНАЛЕ

Н. В. Горская

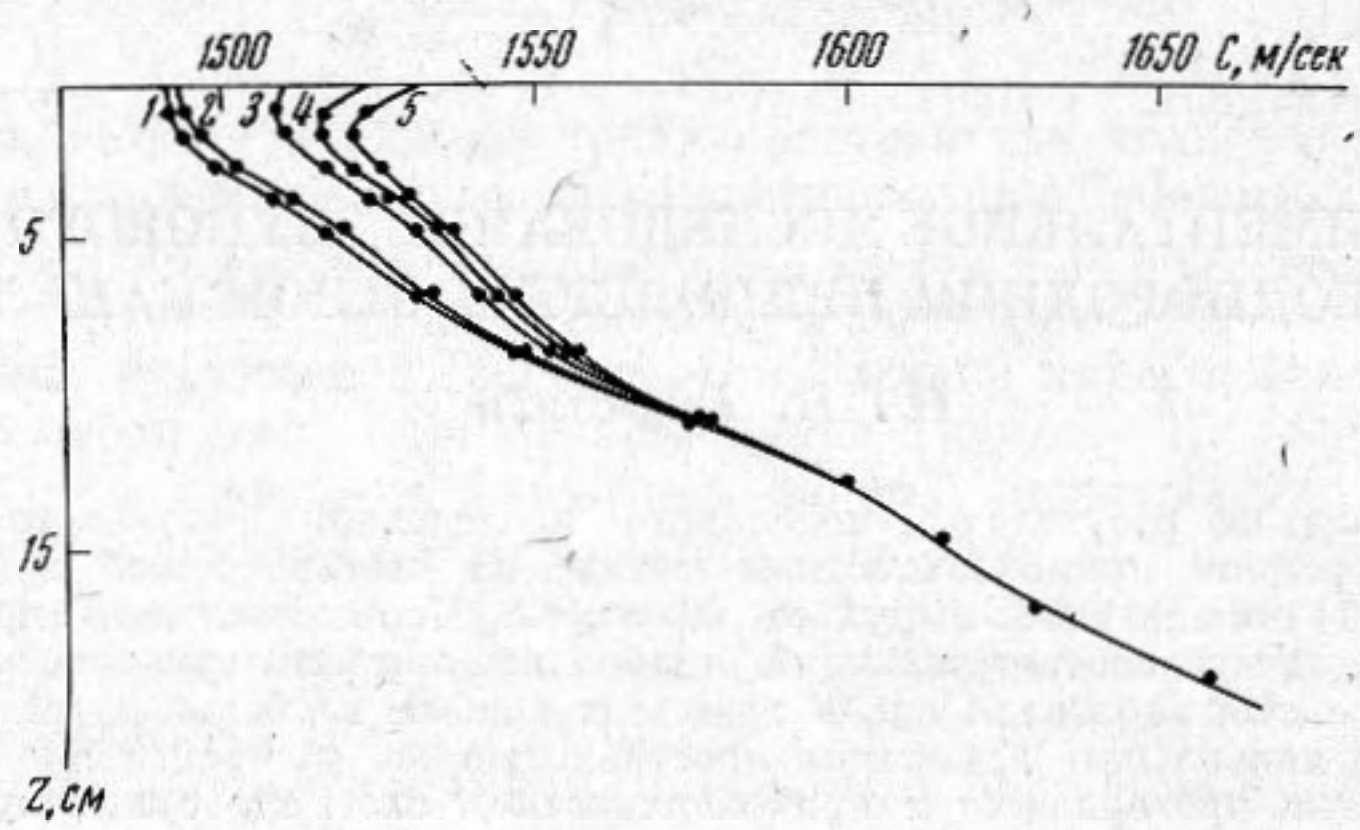
Приведены результаты модельного исследования звукового поля в неоднородном приповерхностном канале на частоте 1 *мгц* при длительности посылаемого импульса 40 *мксек*. Первоначальный профиль скорости звука, соответствующий однородному приповерхностному каналу, трансформировался вдоль трассы в слабый глубоководный. Показано, что наибольшие изменения пространственное распределение звуковой энергии претерпевает в приповерхностном слое, где существует горизонтальный градиент скорости звука.

Законы распространения звука в однородном приповерхностном канале хорошо изучены. Наличие регулярного горизонтального градиента скорости звука усложняет точное решение задачи. Развитые в последние годы методы решения задач распространения волн в лучевом приближении с использованием ЭВМ позволяют учесть изменение вертикального профиля скорости звука вдоль трассы для некоторых приближенных моделей океана [1—3]. Однако сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными иногда трудно провести вследствие многообразия условий распространения и невозможности учета влияния всех сопутствующих факторов. Модельные эксперименты дают возможность сопоставить лучевую теорию и результаты экспериментов для случая неоднородных сред с двумерным распределением скорости звука, а также исследовать поле в областях, где не применимы лучевые представления.

Нами исследовано в модельных условиях распространение акустических волн при распределении скорости звука по вертикали и вдоль трассы распространения звука, показанном на фиг. 1. На фигуре кривые *1—5* показывают вертикальный профиль скорости звука на следующих расстояниях от излучения: *1* — 31, *2* — 131, *3* — 191, *4* — 216, *5* — 246 *см*. Среда указанного вида создавалась по методу моделирования переменных профилей скорости звука [4] путем взаимной диффузии между горизонтальными слоями водных растворов поваренной соли различной концентрации и чистой водой и последующим нагревом части поверхности жидкости.

Как видно на фиг. 1, в жидкости образовалась область, в которой однородный слой или слой со слабым положительным градиентом у поверхности трансформировался вдоль ванны в слой с отрицательным градиентом скорости звука. Толщина этого слоя изменялась в разных опытах от 1 до 4 *см*. Ниже этого слоя до глубины 12—15 *см* первоначальный положительный вертикальный градиент скорости звука постепенно уменьшался. Протяженность переходной области, в пределах которой существенно изменялись свойства канала, составляла около 200 *см*. Относительный горизонтальный градиент скорости звука в ней был максимальным у поверхности ($b \approx 0{,}03$ 1/*м*) и уменьшался с глубиной. В поперечном сечении ванны горизонтальный градиент отсутствовал. Переходная область завершалась слабым звуковым каналом (кривая *5*, фиг. 1).

Эксперименты были выполнены в ванне длиной 4,7 *м*, шириной 68 *см*. Это эквивалентно при коэффициенте моделирования $M=5\cdot10^3$ в натурных условиях акватории размером 23,4×3,4×3 *км*³ с переходной областью протяженностью 10 *км* с максимальным горизонтальным градиентом скорости звука $b_н\approx0{,}6\cdot10^{-5}$ 1/*м* в приповерхностном слое толщиной 50÷200 *м*. Среда с описанными выше характеристиками представляет собой модель пространственного распределения скорости звука, наблюдаемого при определенных условиях в полярных районах у кромки льда.

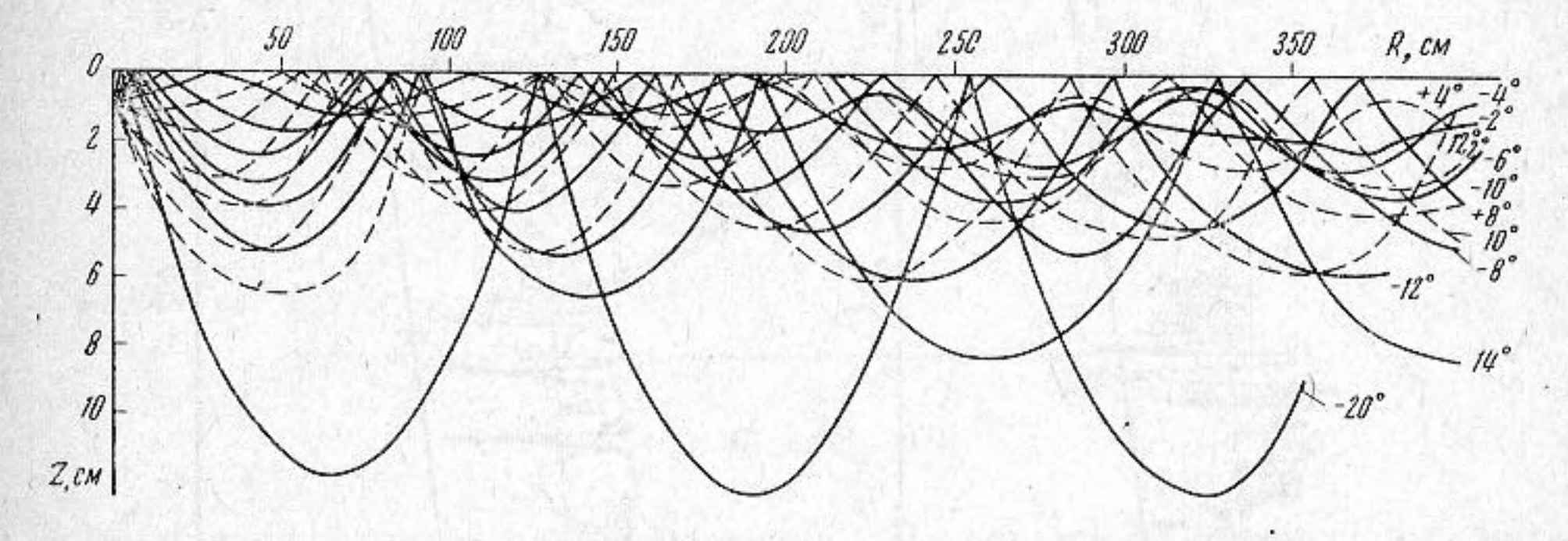


Фиг. 1

Измерение звуковых полей проводилось [5] в импульсном режиме при длительности излучаемых импульсов 40 *мксек*, с частотой заполнения 1 *мгц* и частотой повторения 50 *гц*. Источник звука имел в вертикальной плоскости в пределах ±40° равномерную характеристику направленности; приемник был практически ненаправленным. Звуковое давление измерялось при различных положениях приемно-излучающих устройств в плоскости XZ (ось X направлена вдоль ванны, ось Z — по вертикали).

Для каждого положения излучателя на ЭВМ «Минск-22» рассчитывались лучевые картины в неоднородном канале по программе определения параметров луча при заданной зависимости показателя преломления от пространственных координат [6]. Для оценки влияния горизонтального градиента на геометрию лучей строились также лучевые картины в однородном приповерхностном канале с вертикальным распределением скорости звука, идентичным с существующим в месте расположения излучателя в неоднородном канале. Анализ лучевых картин показывает, что изменение вертикального профиля скорости звука вдоль трассы его распространения вызывает изменение лучевой картины поля источника, расположенного в приповерхностном слое, где существует горизонтальный градиент скорости звука. На фиг. 2 изображен ход лучей в неоднородной среде при расположении излучателя на глубине $h=1$ *см*, причем соответствующий местный вертикальный профиль скорости звука задан кривой *1* на фиг. 1. На фиг. 2 показаны лишь те лучи (величины углов выхода луча из источника в вертикальной плоскости отмечены), траектория которых в неоднородном канале претерпевает наибольшие изменения. Лучи, вышедшие из излучателя под сравнительно большими углами к горизонту, проходят в неоднородной области вблизи поверхности лишь часть своего пути, а другую, большую часть — ниже ее, и поэтому испытывают меньшее влияние горизонтального градиента скорости звука. Сравнение лучевых картин для неоднородного и однородного канала показывает, что в начале трассы они почти не различимы. При дальнейшем распространении волны в неоднородном канале форма лучей изменяется, наблюдается их пространственное перераспределение, нарушение симметрии лучей относительно точек поворота, в результате чего происходит полное или частичное разрушение

зон фокусировки. Действительно, вследствие наличия отрицательного градиента скорости звука у поверхности, часть лучей, обладающих малыми начальными углами скольжения ($\alpha_0<8°$ на фиг. 3), испытывает полное внутреннее отражение, не достигая поверхности, и захватывается глубоководным каналом. Звуковые лучи, не захваченные каналом, отклоняются на бо́льшие глубины, чем в однородном волноводе. При уменьшении вдоль трассы величины вертикального градиента уменьшается угол скольжения

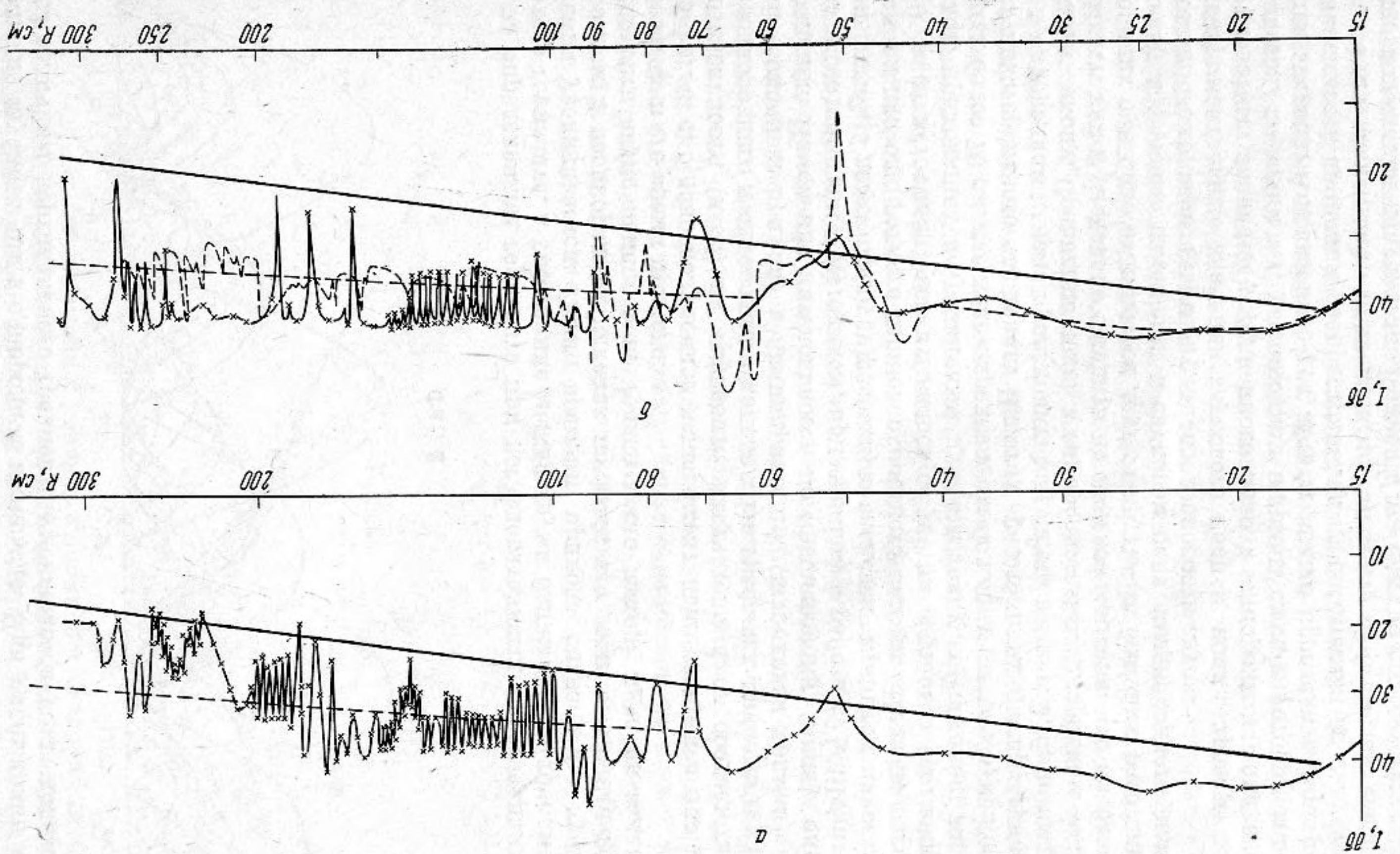


Фиг. 2

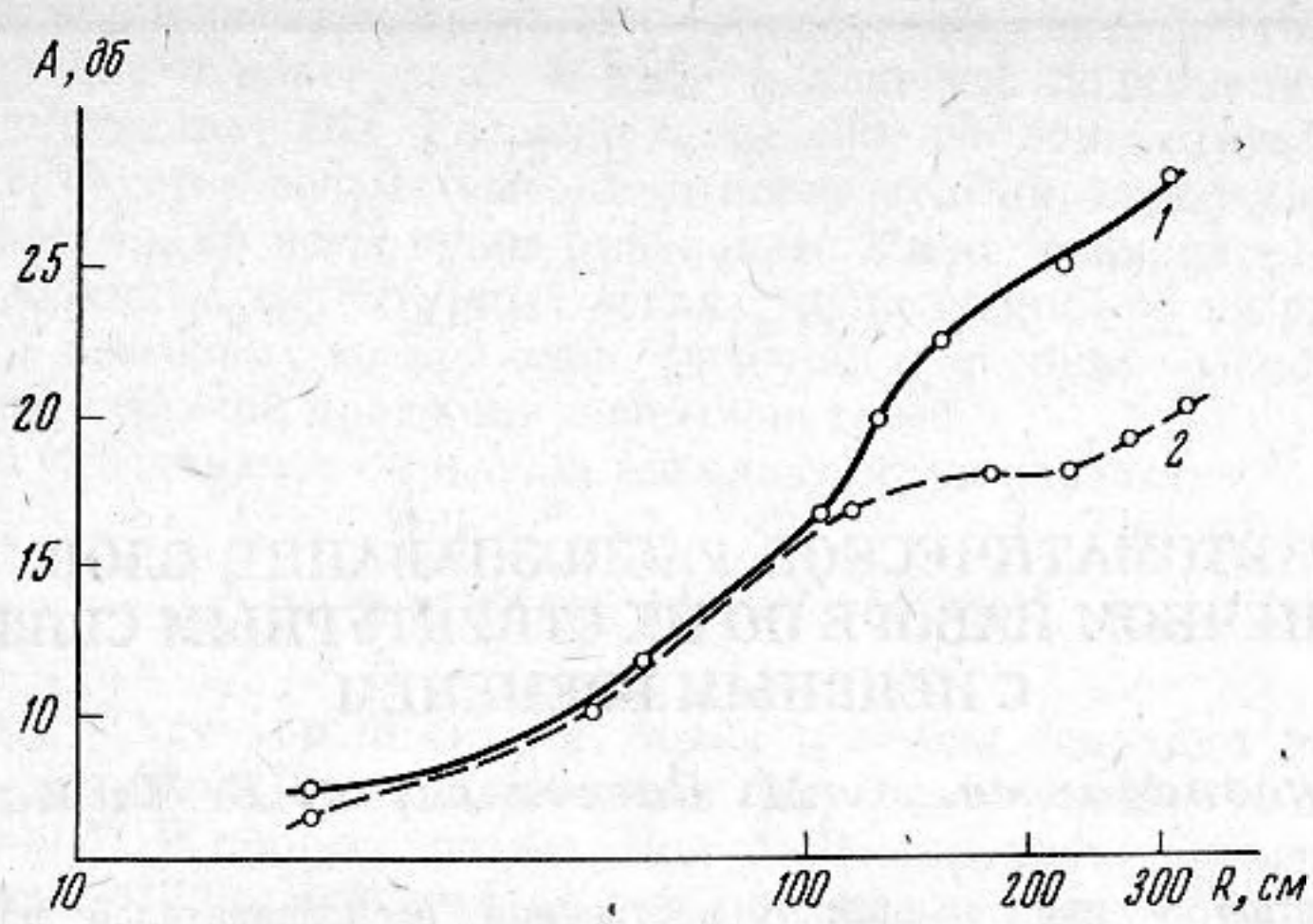
луча на определенном горизонте при последовательных пересечениях лучом этого горизонта, а расстояние между двумя ближайшими точками пересечения увеличивается. Расчет времени прихода сигнала по лучам в однородном и неоднородном каналах показал, что горизонтальный градиент скорости звука изменяет не только место выхода луча на заданный горизонт, но и его время прихода.

На фиг. 3, *а*, *б* дано полученное экспериментально распределение уровня интенсивности (в *дб*) на горизонте излучателя 1 *см* соответственно для неоднородного и однородного каналов. На графиках приведены сферический (сплошная прямая) и цилиндрический (штриховая прямая) законы спадания. Изменение интенсивности по сферическому закону определялось в соответствии с методикой, приведенной в работе [7]. Штриховая кривая фиг. 3, *б* демонстрирует расчетную зависимость интенсивности от расстояния для однородного приповерхностного канала. Поле до расстояния 70 *см* от источника рассчитывалось с учетом фазовых соотношений сигналов, приходящих по различным лучам в точку наблюдения; на расстояниях более 70 *см*, где поле определяется большим числом лучей,— путем их некогерентного сложения. На этих расстояниях распространение звука в однородном канале происходит, как видно на фиг. 3, *б*, по цилиндрическому закону. Сравнение полей в однородном и неоднородном каналах показывает, как и следовало ожидать по лучевой картине, что на близких расстояниях они мало отличаются друг от друга. На больших расстояниях сказываются фазовые изменения в звуковом поле неоднородного канала, обусловленные горизонтальным градиентом скорости звука.

Экспериментальные значения звукового поля в конце трассы лежат ниже расчетных значений усредненного поля в однородном канале. Это объясняется, по-видимому, увеличением ширины слоя, в котором канализируется энергия. Аналогичные результаты можно проследить по графикам зависимости аномалии распространения от расстояния до излучателя. На фиг. 4 эта зависимость приведена на горизонте $z=6$ *см* для указанного выше положения излучателя. Кривая *1* на фигуре соответствует изменению аномалии распространения в точках с максимальной интенсивностью в однородном канале, кривая *2* — в неоднородном. Следует, однако, отметить, что вследствие фокусирования части лучей значения максимальной аномалии в некоторых точках оказались больше, чем в соответственных точках однородного канала. Это подтверждают измерения звукового


I, дб
40
30
20
10
15
20
30
40
60
80
100
200
300 R, см
а
I, дб
40
20
15
20
25
30
40
50
60
70
80
90
100
200
250
300 R, см
б

Фиг. 4



Фиг. 4

поля, проведенные на ряде горизонтов. На больших глубинах, где поле обусловлено лучами, траектории которых мало искажаются при наличии горизонтального градиента, характер изменения поля остается таким же, как в однородном приповерхностном канале.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Елисеевнин. Расчет лучей, распространяющихся в неоднородной среде. Акуст. ж., 1964, **10**, 3, 284—288.
2. H. J. Lugt, P. Ugincius. Acoustic rays in an Ocean with heat source or thermal-mixing zone. J. Acoust. Soc. America, 1964, **36**, 4, 689—694.
3. Д. А. Нильсон. Уравнение траектории луча в ионизованном слое с горизонтальным градиентом. Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. М., «Наука», 1971.
4. А. Н. Бархатов, Н. В. Горская. Об исследовании акустического поля в средах с вертикальным профилем скорости звука, переменным по трассе, с помощью физической модели. Акуст. ж., 1971, **17**, 2, 205—209.
5. А. Н. Бархатов. Моделирование распространения звука в море. Л., Гидрометеоиздат, 1968.
6. О. П. Галкин, Л. В. Трегубова. Распространение звука при наличии внутренних волн. Тр. Акустического ин-та АН СССР, 1970, 13, 107—113.
7. Н. С. Агеева. Методика анализа результатов измерения звукового поля в океане. Тр. Акустического ин-та АН СССР, 1970, 13, 22—31.

Горьковский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского

Поступила
26 апреля 1972 г.