АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1997, том 43, № 3, с. 293–298

УДК 551.46

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОДА НА ЗАКОНЫ СПАДА ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ОКЕАНЕ

© 1997 г. Н. К. Абакумова, О. П. Галкин

Акустический институт им. Н.Н. Андреева
117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 26.12.95 г.

Методом машинного экспериментирования анализировалось влияние переменных по трассе океанологических условий (профилей скорости звука, рельефа и характеристик дна, поверхностного волнения) на изменения интенсивности звуковых полей с расстоянием при неизменном по толщине волноводе и при переходе от берегового шельфа к глубокому океану.
Проведена оценка возможности определения интенсивности звукового поля на больших расстояниях от источника звука с помощью переходного расстояния.

Исследования спадания энергии звукового сигнала с расстоянием при проведении опытов в океане на протяженных трассах в несколько сотен километров в районах со сложным пространственным изменением поля скорости звука, характерным для районов, включающих фронтальные зоны или расположенных вблизи континентального склона, являются весьма актуальными. Анализ имеющихся материалов [1–3] показывает, что влияние изменяющихся по трассе океанологических условий (поле скорости звука, рельеф дна, параметры грунта, поверхностное волнение и др.) изучено недостаточно. Без выяснения этого влияния, даже для глубокого океана, когда границы волновода в большинстве случаев не оказывают заметного влияния на структуру поля, невозможно с достаточной степенью надежности прогнозировать различные характеристики звуковых полей, основываясь лишь на знании характерного для рассматриваемого района профиля скорости звука $c(z)$.

Приведенные расчетные зависимости спадания интенсивности звукового поля с расстоянием $I(r)$ были получены как для относительно простых зависимостей скорости звука от глубины и расстояния $c(z, r)$, позволяющих оценить влияние отдельных фрагментов $c(z, r)$, так и для профилей скорости звука $c(z)$, измеренных при проведении акустических опытов поперек континентального склона восточного побережья полуострова Камчатка. Исследование характеристик звуковых полей проведено методом машинного экспериментирования с помощью программы, основанной на лучевой теории распространении звука, которая позволяет проводить расчеты для глубокого океана, мелкого моря и для сложных волноводов, соответствующих переходу от глубокого океана к береговому шельфу с учетом рельефа дна, его акустических характеристик и отражения звука от взволнованной поверхности океана.

Оценка влияния взволнованной поверхности океана проводилась в соответствии с формулой Рэлея: коэффициент отражения в зеркальном направлении $V = \exp(-P^2/2) = \exp(-2k^2\sigma^2\sin^2\chi)$. В этой формуле: $P = 2k\sigma\sin\chi$ – параметр Рэлея, $k = 2\pi f/c$ – волновое число звука, f – частота, c – скорость звука в воде, σ – среднеквадратичное смещение поверхности, χ – угол скольжения луча у поверхности воды. Рассматривались два состоя-

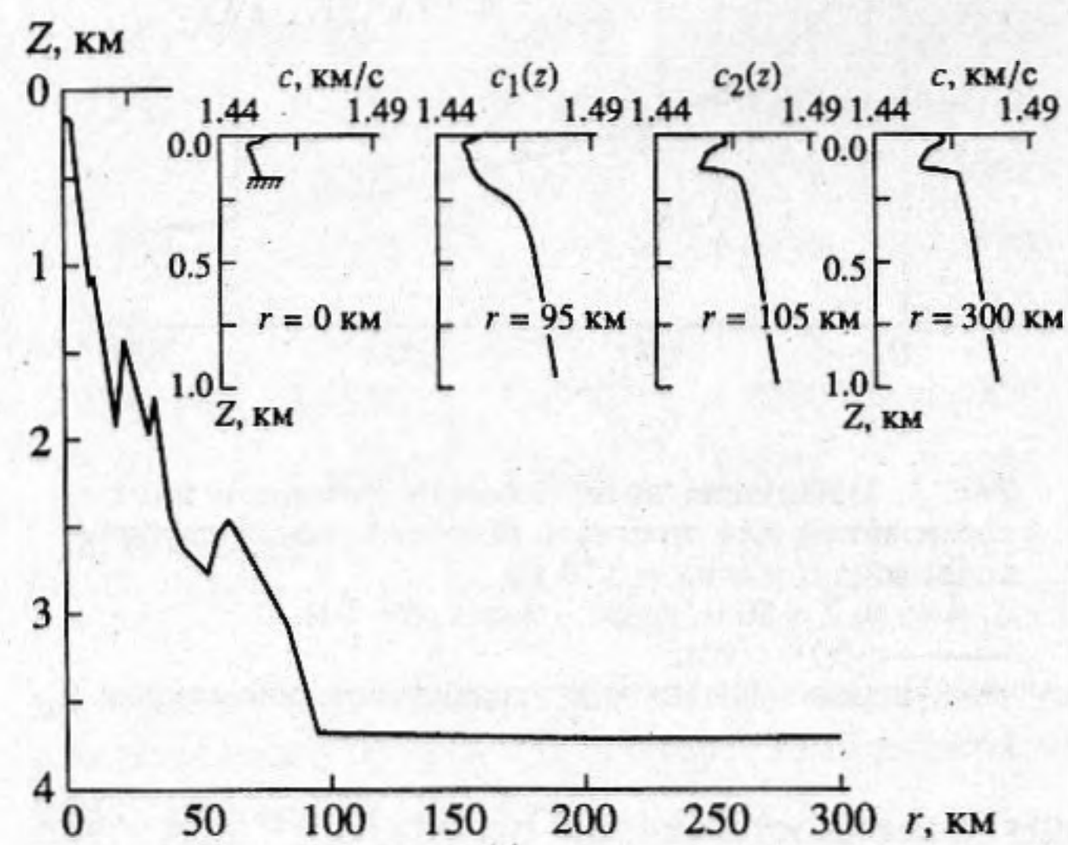

Рис. 1. Рельеф дна у побережья Камчатки и профили скорости звука $c(z)$ для нескольких расстояний (0; 95; 105 и 300 км), характеризующие пространственные изменения поля скорости звука.

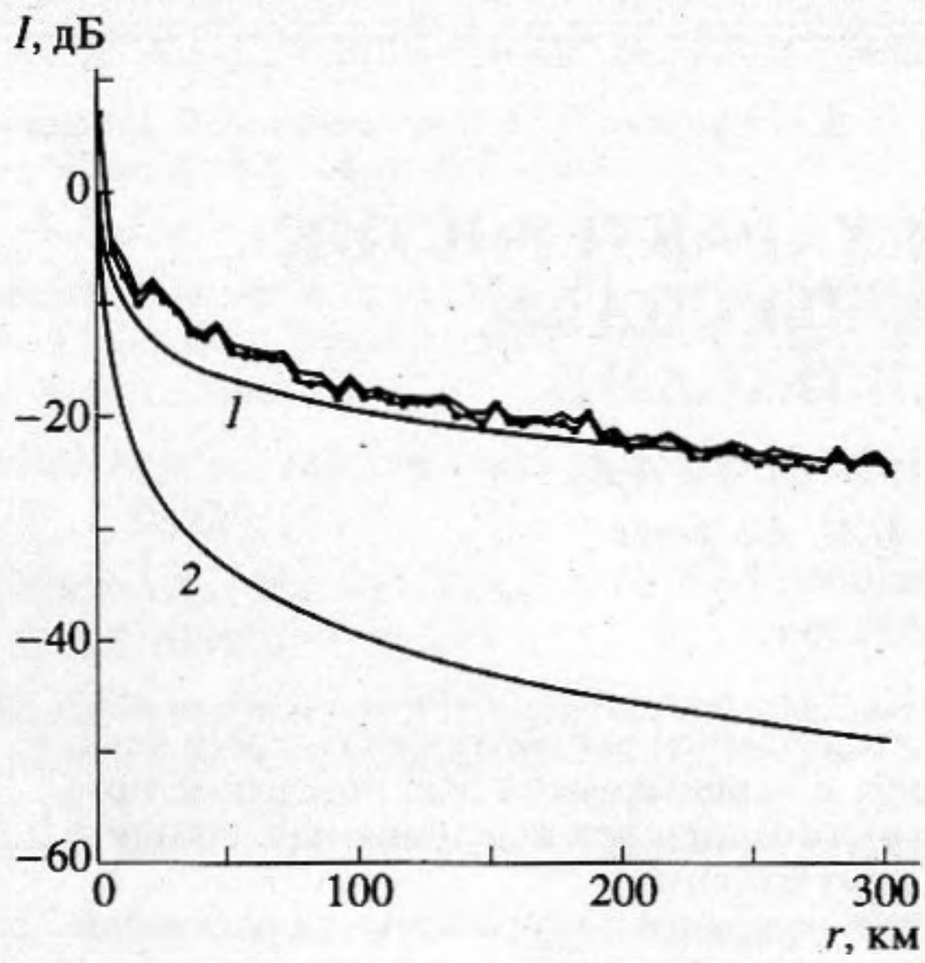

Рис. 2. Изменения интенсивности звукового поля с расстоянием при неизменном профиле скорости звука $c_1(z) = \text{const}$ для трассы 1. Глубина источника и приемника $Z_1 = Z = 45$ м, грунт – песок, $\sigma = 0$ м.
——— $H = \text{const} = 3.74$ км,
–*–*– с учетом рельефа дна.

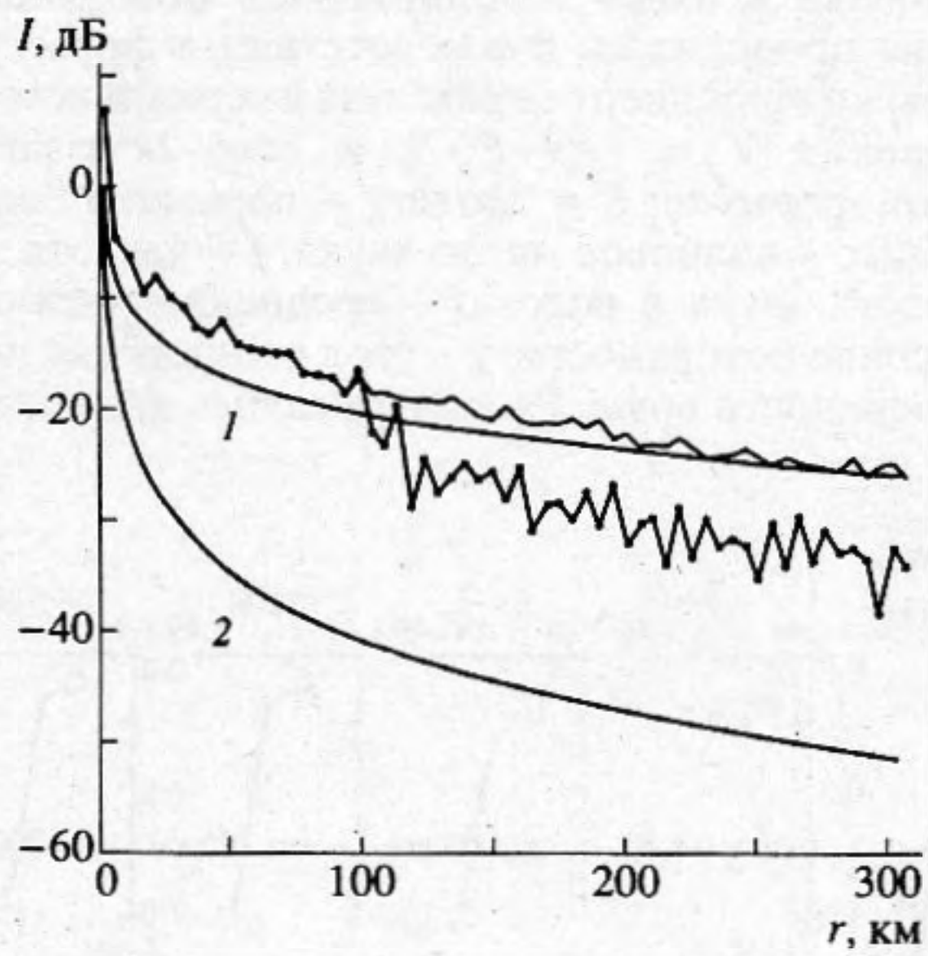

Рис. 3. Изменения интенсивности звукового поля с расстоянием для трассы 1 при постоянной глубине волновода $H = \text{const} = 3.74$ км.
$Z_1 = 45$ м, $Z = 50$ м, грунт – песок, $\sigma = 0$ м.
——— $c_1(z) = \text{const}$,
–*–*– переменные по трассе гидрологические условия.

ния поверхности океана: ровная ($\sigma = 0$ м) и взволнованная поверхность воды при волнении 5 баллов ($\sigma = 0.77$ м).

В качестве модели дна использовалось жидкое поглощающее полупространство. Расчеты звуковых полей проводились для двух наиболее сильно различающихся по значениям коэффициента отражения типов осадков: песок и ил [4]. Для песчаного дна, обладающего максимальным коэффициентом отражения, приняты следующие параметры грунта: $m = \rho_{гр}/\rho_в = 1.9$, $n = c_в/c_{гр} = 0.9$, $\eta = 0.02$ (здесь $\rho_{гр}$, $\rho_в$ – плотности грунта и воды, $c_в$ и $c_{гр}$ – скорости звука в воде и грунте, η – коэффициент потерь), а для слабоотражающего илистого дна $m = 1.44$, $n = 0.98$, $\eta = 0.01$.

Исследовались законы спадания энергии звукового сигнала с расстоянием при переходе от берегового шельфа к глубокому океану. При этом учитывались не только пространственные изменения поля скорости звука, но и измеренный рельеф дна, представленный на рис. 1. Как видно из рисунка, изучаемый волновод состоял из относительно короткого мелководного участка протяженностью около 5 км и из значительно более протяженной (295 км) части с глубинами, превышающими 1 км. При переходе от мелководья в сторону открытого океана глубина моря H, начиная со 160 м, сначала изменялась медленно, затем быстро росла (углы наклона от 6.5 до 8.5°), так, что при удалении примерно на 9 км она составляла уже более 1 км. Далее глубина постепенно увеличивалась до 3740 м.

Гидрологические условия соответствовали случаю подводного звукового канала, положение оси которого изменялось от 40 до 130 м. При этом у побережья полуострова Камчатка (в мелководной части волновода) профили $c(z)$ имели минимум на горизонте 40 м. Затем, по мере удаления от берега, происходило заглубление оси подводного звукового канала, так что в глубоком океане ось канала находилась на глубине 130 м. Профили скорости звука $c(z)$ для ряда расстояний приведены в верхней части рис. 1.

Изменения интенсивности звукового поля с расстоянием изучались для двух трасс. Трасса 1 соответствовала случаю, когда излучатель находился в районе берегового шельфа, а прием осуществлялся в глубоком океане. Трасса 2 – при расположении излучателя в глубоком океане, а приемника – в мелководной части волновода.

При расчетах звуковых полей использовался точечный источник, создававший в однородной безграничной среде на расстоянии $r = 1$ км уровень звукового поля, равный 0 дБ.

Для того чтобы оценить влияние отдельных компонент рассматриваемых сложных с акустической точки зрения трасс (изменяющиеся гидрологические условия и глубина моря, различные характеристики грунта и поверхностное волнение), рассмотрим сначала ряд более простых случаев.

На рис. 2 представлено изменение интенсивности звукового поля I с расстоянием r для волновода постоянной толщины (H = 3.74 км) при профиле скорости звука $c_1(z)$ (см. рис. 1) с положением оси канала на глубине 40 м, постоянном по трассе (сплошная линия). Глубины расположения источника и приемника – 45 м. Расчет проведен для песчаного грунта и ровной поверхности океана (σ = = 0 м). Здесь, так же как и на других аналогичных рисунках, нанесены кривые, соответствующие изменению звукового поля с расстоянием по цилиндрическому (1) $I = -10\log(r)$ и сферическому (2) $I = -20\log(r)$ закону. Как видно, уменьшение интенсивности с расстоянием в рассматриваемом случае соответствует цилиндрическому закону. На этом же рисунке для того же профиля $c_1(z)$ = const приведено изменение интенсивности $I(r)$ с учетом рельефа дна, приведенном на рис. 1, когда источник находился в мелководной части трассы, а приемник удалялся в сторону глубокого океана. Обе зависимости $I(r)$ близки, и их различия в уровнях звукового поля не превышают 2 дБ.

На рис. 3 приведена зависимость интенсивности звукового поля от расстояния r для волновода, глубина которого (3.74 км) на всей трассе сохраняется неизменной, но профиль скорости звука уже не остается постоянным, а изменяется в соответствии с рис. 1 (см. табл.), т.е. когда ось подводного звукового канала опускается с глубины 40 м на 130 м. При расчетах предполагалось, что излучатель и приемник находились на глубине z_1 = 45 м и z = 50 м, соответственно. Здесь же показан спад уровней звукового поля, соответствующий постоянному по трассе профилю скорости звука, при тех же глубинах корреспондирующих точек. Если на начальном участке трассы для обоих рассматриваемых случаев изменения интенсивности близки к цилиндрическому закону, то на дистанциях, превышающих 100 км, отклонение от него для переменных условий по трассе может составить уже около 10 дБ.

Для тех же параметров волновода, но при волнении 5 баллов (σ = 0.77 м) для частоты звука 630 Гц картина принципиальным образом не изменяется, только интенсивность звукового поля практически на всех дистанциях несколько уменьшается (на 1–2 дБ).

Рассмотрим теперь, как влияют на законы спада не только изменения гидрологических условий по трассе, но и изменения глубины океана, соответствующие трассе 1, т.е. когда источник расположен в мелководной части трассы на глубине Z_1 = 45 м, а приемник, находящийся на глубине Z = 50 м, удаляется в сторону глубокого океана.

На рис. 4 приведены зависимости интенсивности звукового поля от расстояния $I(r)$ при неизменном и изменяющемся профиле $c(z)$ и рельефе дна, соответствующем трассе 1. Расчет проведен для песчаного грунта и при отсутствии поверхностного волнения (σ = 0 м).

Таблица

Z, km	$c(z)$, km/c			
	0	95	105	301 r, km
0.00	1.4567	1.4567	1.4616	1.4616
.010	1.4535	1.4535	1.4618	1.4618
.020	1.4534	1.4534	1.4626	1.4626
.030	1.4493	1.4493	1.4620	1.4620
.040	1.4484	1.4484	1.4617	1.4617
.045	1.4486	1.4486	1.4605	1.4605
.050	1.4489	1.4489	1.4592	1.4592
.060	1.4493	1.4493	1.4575	1.4575
.065	1.4495	1.4495	1.4573	1.4573
.075	1.4499	1.4499	1.4569	1.4569
.095	1.4506	1.4506	1.4552	1.4552
.100	1.4507	1.4507	1.4550	1.4550
.115	1.4514	1.4514	1.4546	1.4546
.120	1.4515	1.4515	1.4543	1.4543
.130	1.4518	1.4518	1.4539	1.4539
.150	1.4525	1.4525	1.4633	1.4633
.165	1.4531	1.4531	1.4666	1.4666
.175	1.4534	1.4534	1.4672	1.4672
.200	1.4558	1.4558	1.4677	1.4677
.250	1.4624	1.4624	1.4688	1.4688
.300	1.4664	1.4664	1.4696	1.4696
.385	1.4693	1.4693	1.4708	1.4708
.410	1.4697	1.4697	1.4711	1.4711
.590	1.4730	1.4730	1.4730	1.4730
.970	1.4774	1.4774	1.4774	1.4774
.990	1.4777	1.4777	1.4777	1.4777
2.00	1.4888	1.4888	1.4888	1.4888
2.50	1.4950	1.4950	1.4950	1.4950
3.30	1.5036	1.5036	1.5036	1.5036
4.00	1.5111	1.5111	1.5111	1.5111

Как и следовало ожидать, только на начальном участке трассы изменения интенсивности для обоих случаев близки друг к другу, а при прибли-

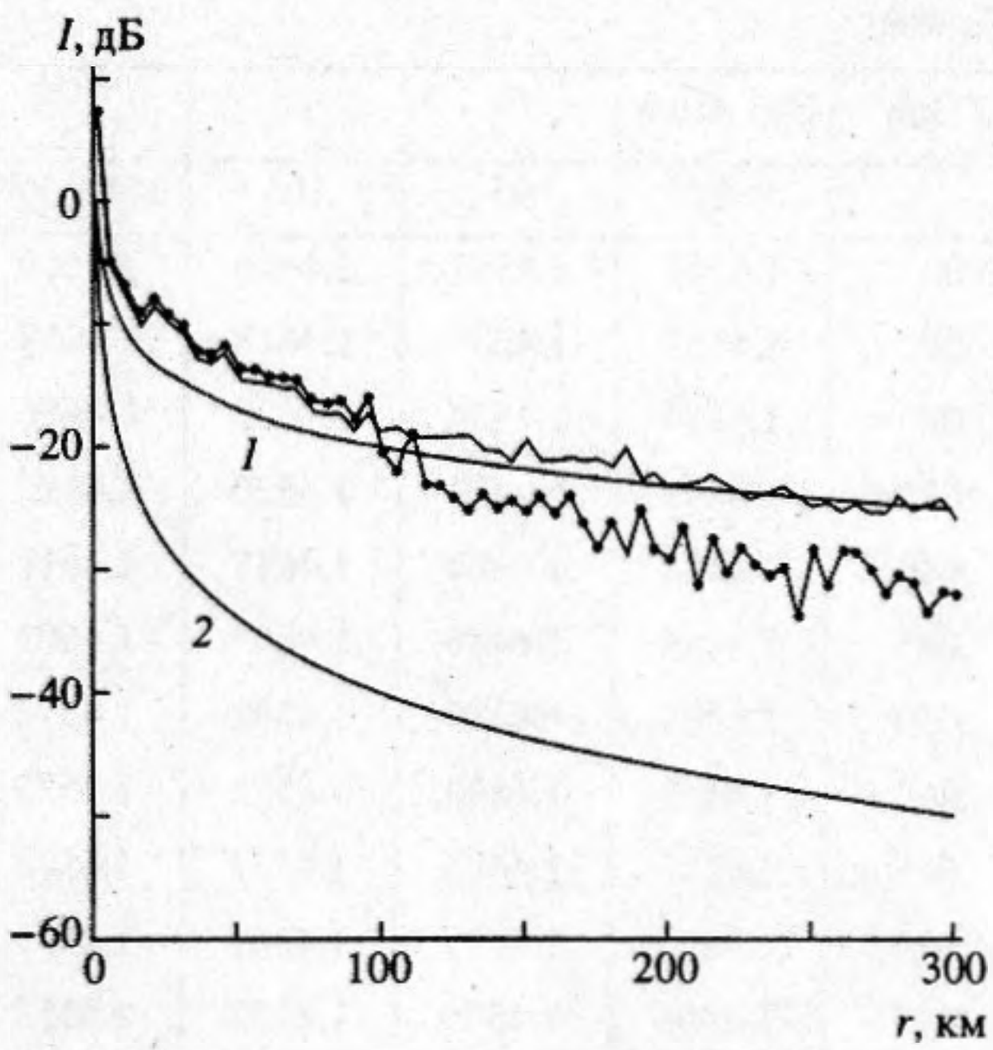

Рис. 4. Зависимости интенсивности звукового поля от расстояния для трассы 1 при учете рельефа дна.
Z_1 = 45 м, Z = 50 м, грунт – песок, σ = 0 м.
——— $c_1(z)$ = const,
–*–*– переменные по трассе гидрологические условия.

жении к концу трассы (300 км), как и в предыдущем случае, разница в уровнях звукового поля может достигать 8–10 дБ.

Для упрощения задачи по оценке влияния на энергетическую структуру поля различных элементов волновода (профили $c(z)$, рельеф и характеристики дна, поверхностное волнение) и параметров излучения и приема (глубины расположения корреспондентов, ширина диаграммы направленности и др.) были рассмотрены изменения интенсивности I с расстоянием r для профилей $c(z)$ с линейной зависимостью скорости звука от глубины при тех же значениях, что и в реальных $c(z)$ у поверхности моря, на оси подводного звукового канала и у дна. Расчеты звуковых полей проводились для излучателя, имеющего диаграмму направленности с постоянным уровнем в секторе $\chi = \pm 15°$ или $\chi = \pm 20°$ и нулевым уровнем вне этого сектора. Сопоставление изменений интенсивности звукового поля с расстоянием при разной ширине диаграмм направленности в указанных пределах и для различных профилей скорости звука показало, что для рассмотренных океанологических условий результаты расчетов практически не зависят от ширины диаграммы направленности. Для примера на рис. 5 приведен спад интенсивности с расстоянием для различных

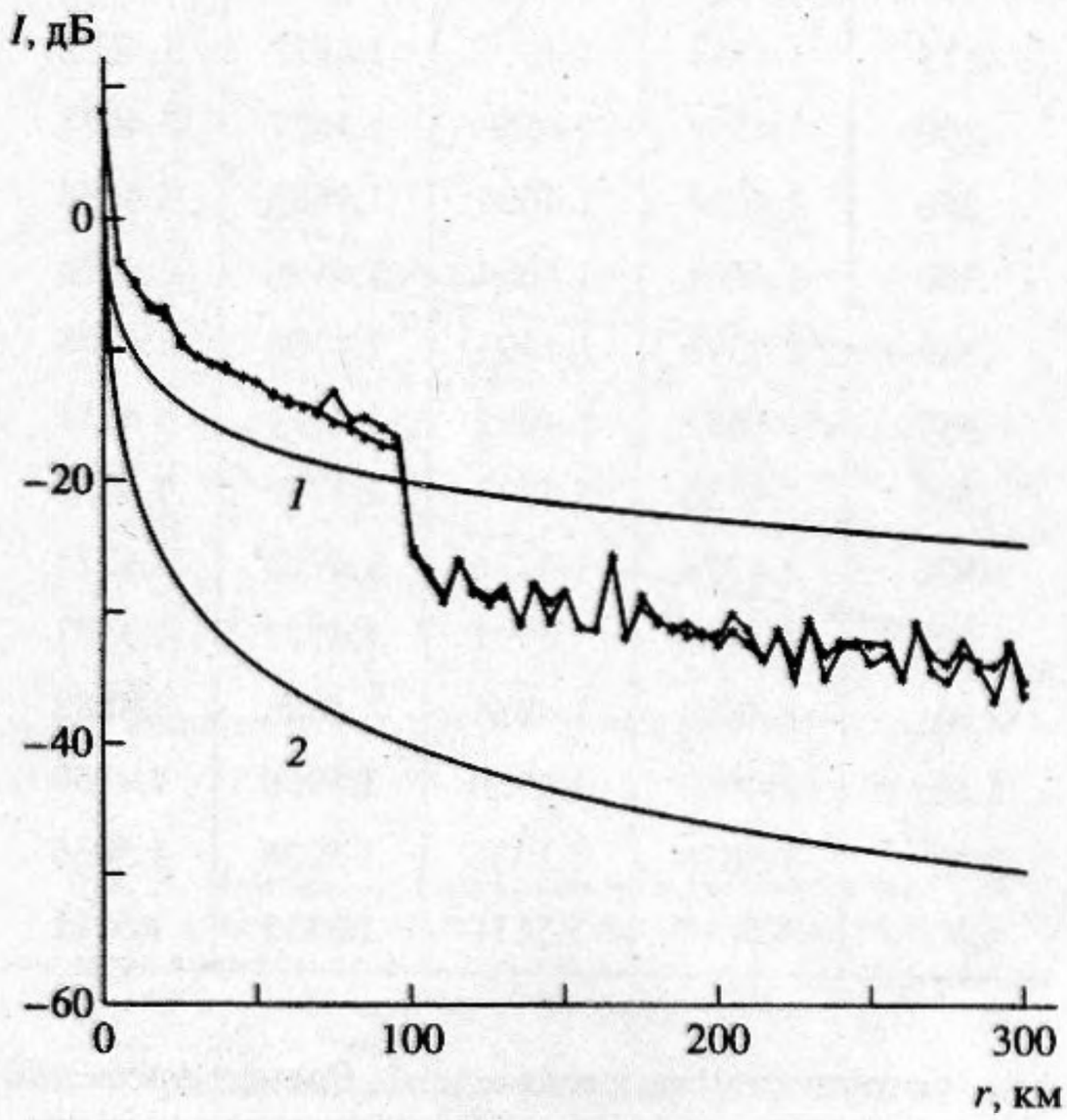

Рис. 5. Интенсивности звукового поля в зависимости от расстояния для изменяющихся по трассе билинейных профилей $c(z)$ при различной ширине диаграмм направленности источника в вертикальной плоскости.
$Z_1 = Z$ = 45 м, грунт – песок, σ = 0 м, H = const = 3.74 км.
——— $\chi = \pm 15°$,
–*–*– $\chi = \pm 20°$.

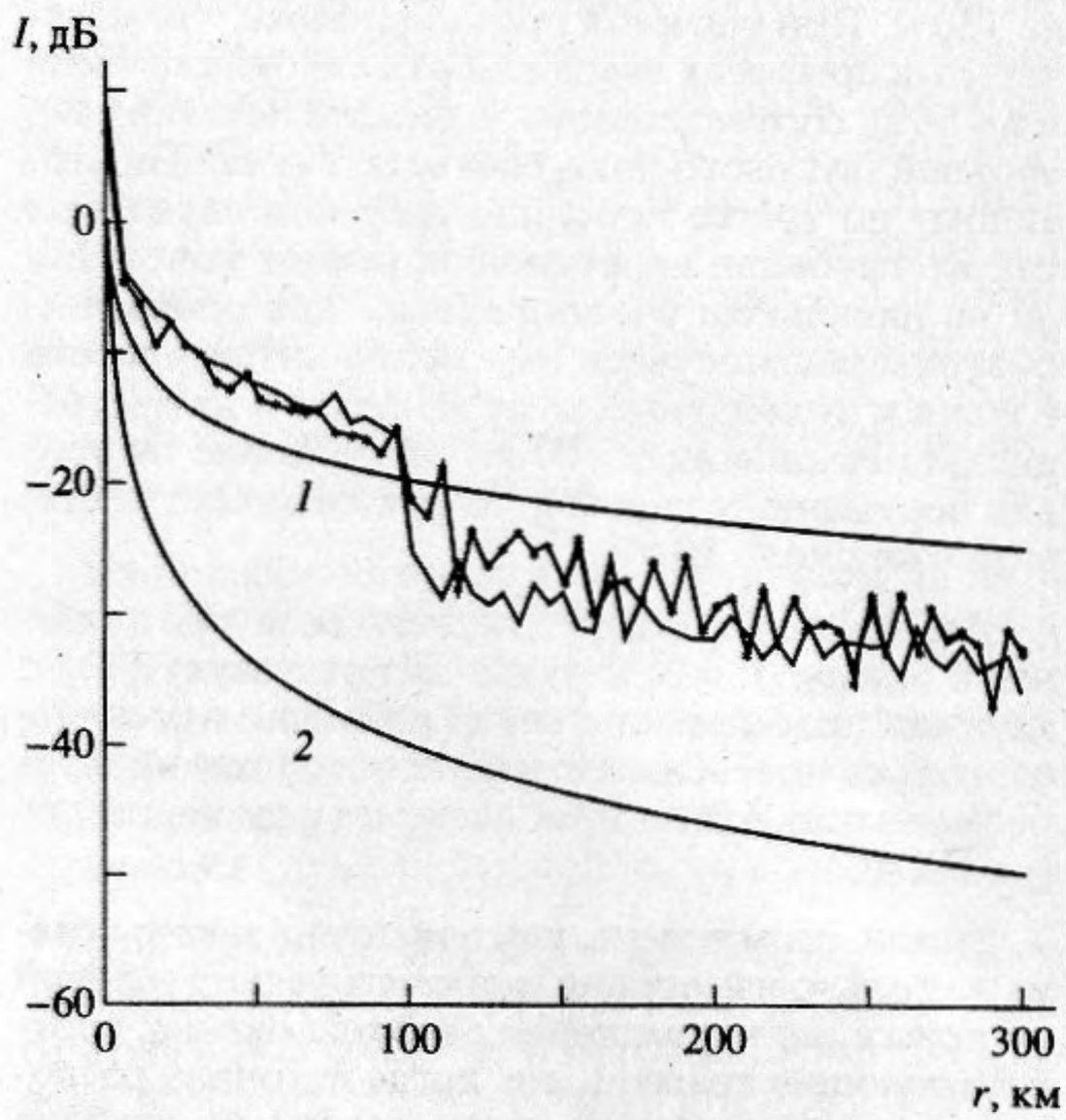

Рис. 6. Зависимости интенсивности звукового поля от расстояния для изменяющихся по трассе 1 профилей скорости звука.
Z_1 = 45 м, Z = 50 м, грунт – песок, σ = 0 м, H = const = = 3.74 км.
——— билинейные профили $c(z)$,
–*–*– измеренные профили $c(z)$.

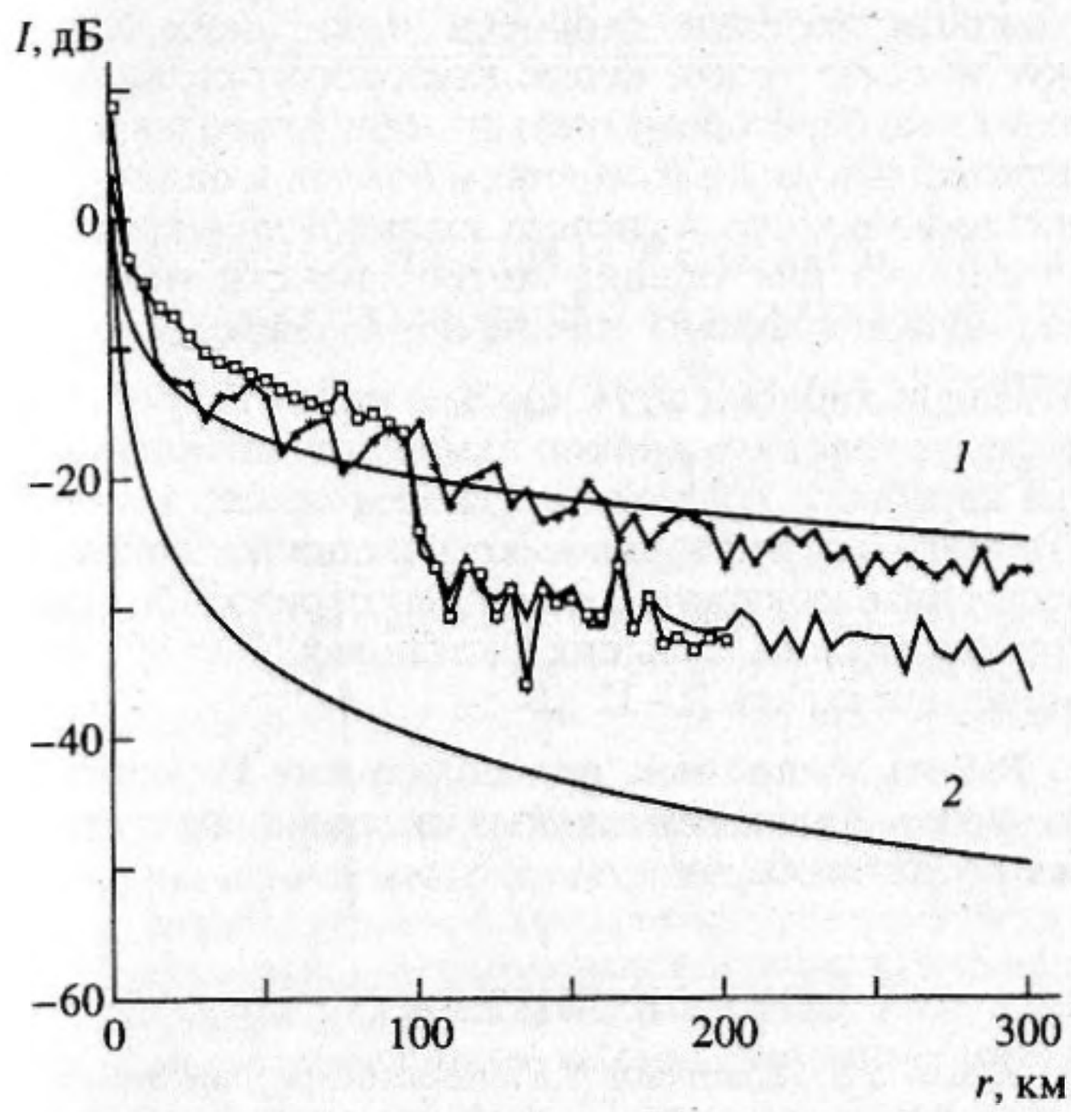

Рис. 7. Зависимости интенсивности звукового поля от расстояния для изменяющихся по трассе 1 билинейных профилей скорости звука.
Грунт – песок, σ = 0 м.
——— Z_1 = 45 м, Z = 50 м, H = const = 3.74 км,
–□–□– Z_1 = 45 м, Z = 50 м с учетом рельефа дна,
–*–*– Z_1 = 130 м, Z = 135 м с учетом рельефа дна.

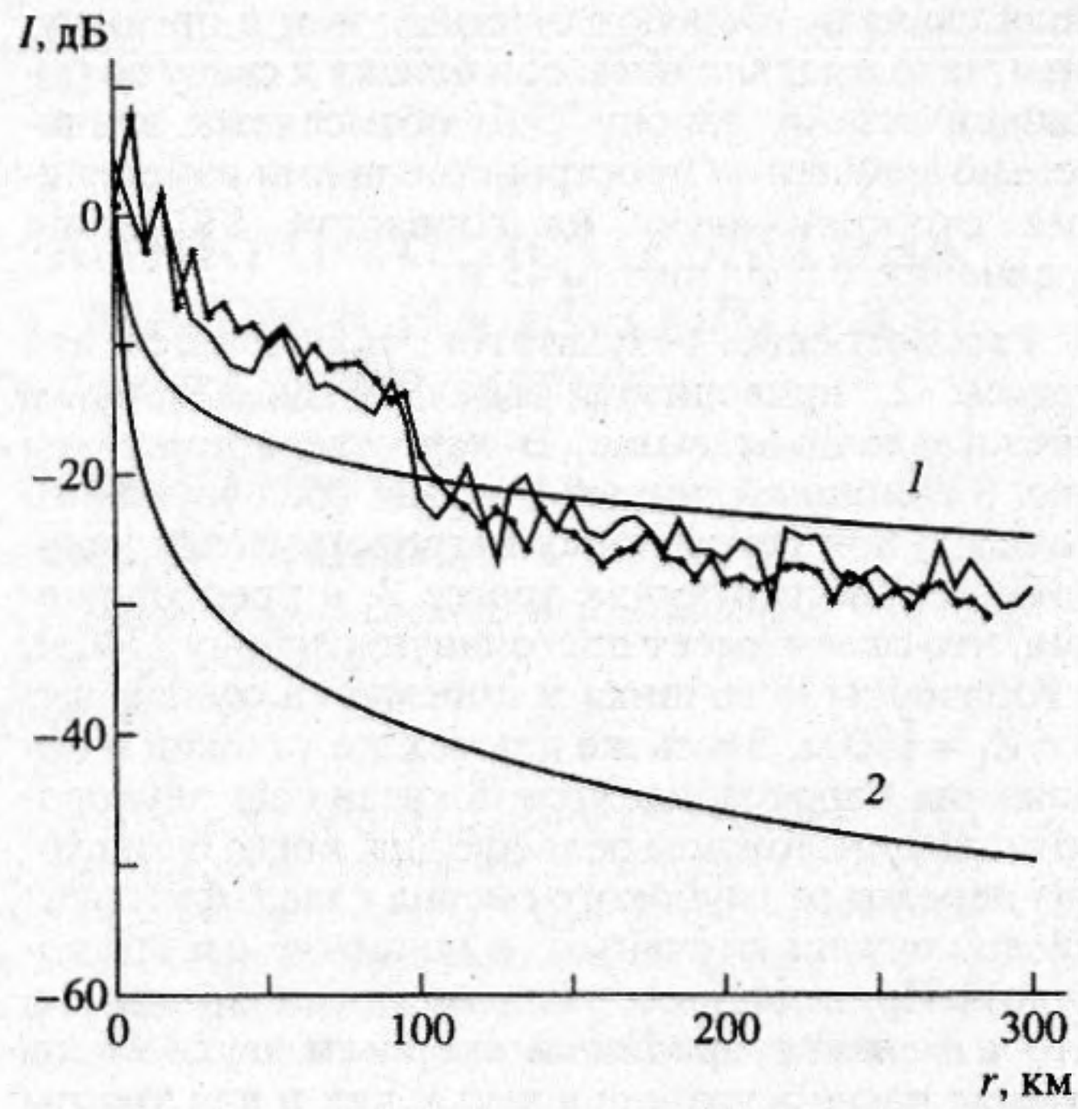

Рис. 8. Интенсивности звукового поля в зависимости от расстояния (трасса 2) для переменных гидрологических условий.
Z_1 = Z = 130 м, грунт – песок, σ = 0 м.
——— H = const = 3.74 км,
–*–*– для реального рельефа дна.

диаграмм направленности источника ($\chi = \pm 15°$; $\chi = \pm 20°$) для изменяющихся по трассе билинейных профилей $c(z)$. Здесь видно хорошее совпадение не только средних уровней силы звука, но и соответствие пространственных изменений в уровнях звукового поля.

Естественно возникает вопрос, насколько замена рассмотренных профилей скорости звука на билинейные меняет картину звукового поля.

На рис. 6 показаны зависимости интенсивности звукового поля от расстояния $I(r)$ для билинейных (сплошная линия) и для измеренных профилей $c(z)$ при глубине источника Z_1 = 45 м и приемника Z = 50 м. Расчеты проводились для песчаного грунта при σ = 0 м при диаграмме направленности источника в вертикальной плоскости $\chi = \pm 15°$. Как видно из рис.6, на начальном участке трассы до расстояний r = 100 км спад интенсивности $I(r)$ практически одинаков как для реальных, так и для билинейных профилей $c(z)$. Кроме того, на расстояниях, превышающих 200 км, средние уровни звуковых полей также близки друг к другу. На промежуточных дистанциях (100–150 км) в связи с различиями при переходе от одного профиля к другому наблюдаются некоторые отличия, однако ход кривых принципиальным образом не изменяется.

Для того чтобы показать влияние глубины излучения и приема на характер спада звуковых полей $I(r)$, на рис. 7 приведено несколько кривых, рассчитанных для изменяющихся по трассе билинейных профилей скорости звука. Сплошная линия соответствует положению излучателя на горизонте Z_1 = 45 м и приемнику на глубине Z = 50 м при постоянной глубине волновода, равной 3740 м, а линия с квадратиками – тому же положению источника и приемника, но с учетом переменного рельефа дна (на дистанциях, меньших 100 км, обе линии совпадают). Отчетливо видно, что в рассматриваемых условиях рельеф дна и его акустические характеристики практически не сказываются на структуре звукового поля. Линией со звездочками показано изменение интенсивности поля с расстоянием для тех же изменяющихся по трассе билинейных профилей скорости звука с учетом рельефа дна, но при бóльших глубинах излучения и приема (Z_1 = 130 м, Z = 135 м). В первом случае (при Z_1 = 45 м, Z = 40 м) переменные по трассе профили скорости звука приводят к быстрому уменьшению интенсивности поля после области перехода от одного профиля к другому, аналогично тому, что наблюдалось и для измеренных профилей $c(z)$ (см. рис. 3 и 4). Во втором случае (Z = = 135 м, Z_1 = 130 м) уровни звукового

поля сначала убывают быстрее, чем в предыдущем, зато в дальнейшем они близки к спаду по цилиндрическому закону. Это объясняется значительно меньшими пространственными изменениями скорости звука на горизонте 130 м по сравнению с горизонтом 45 м.

Рассмотрение результатов, полученных для трассы 2, приводит к выводам, аналогичным представленным выше. В качестве примера на рис. 8 сплошной линией показан спад звукового поля $I(r)$ при переменных гидрологических условиях, соответствующих трассе 2, в предположении, что океан имеет постоянную глубину 3740 м, а горизонты источника и приемника совпадают: $Z = Z_1 = 130$ м. Здесь же для тех же условий и положения корреспондентов показан спад звукового поля при сложном рельефе дна, когда происходит переход от глубокого океана к шельфу (грунт предполагался песчаным, а волнение отсутствовало). Приведенные зависимости показывают, что изменение профилей скорости звука вдоль трассы распространения звука, как и для трассы 1, приводит к спаданию интенсивности с расстоянием, отличающемуся от цилиндрического, а рельеф дна и параметры грунта в данных условиях практически не оказывают заметного влияния.

Расчеты, проведенные для рассматриваемых трасс (1 и 2) с заменой песчаного дна на илистое, а также при учете 5-балльного поверхностного волнения ($\sigma = 0.77$ м) для частоты 630 Гц не привели к заметным изменениям характера спада интенсивности с расстоянием (отличия не превышают 1–3 дБ).

Таким образом, приведенные результаты показывают, что в рассмотренных условиях при постоянном профиле скорости звука, даже когда акустическая трасса кроме глубокого океана проходит и по береговому шельфу, спад интенсивности звукового поля с расстоянием близок к цилиндрическому закону и использование переходного расстояния для оценки интенсивности поля на больших дистанциях вполне оправданно.

Для волновода же с переменными гидрологическими условиями закон изменения интенсивности звукового поля с расстоянием может заметно отличаться от цилиндрического и ошибка в определении интенсивности с помощью переходного расстояния даже на больших дистанциях (200–300 км) может достигать 10–12 дБ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 94-02-04149).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dosso S.E., Chapman N.R.* Acoustic propagation in a shallow sound channel in the Northeast Pacific Ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1984. V. 75. № 2. P. 413–418.
2. *Dosso S.E, Chapman N.R.* Measurement and modeling of downslope acoustic propagation loss over a continental slope // J. Acoust. Soc. Amer. 1987. V. 81. 258–268.
3. *Chung-Wu Wang, Dong-Ping Wang R.D.*, Flood. Determination of environmental sensitivity of acoustic propagation on continental shelves using an equivalent fiuid parabolic equation model // J. Acoust. Soc. Amer. 1985. V. 97. № 3. P. 1596–1606.
4. *Абакумова Н.К., Галкин О.П.* Угловая зависимость коэффициента отражения от дна для различных типов морских осадков // Научно-техн. сб. Вопросы судостроения, сер. Акустика. 1980. Вып. 14. С. 90–100.

The Effect of Variable Ocean Waveguide Characteristics on the Decay of Sound

N. K. Abakumova and O. P. Galkin

The effect of variable oceanological conditions (sound velocity profiles, bottom topography and characteristics, sea surface roughness) on the distance-dependent behavior of sound intensity is analyzed by computer simulations of a waveguide of constant depth and a waveguide with a transition from the coastal shelf to the deep ocean. The possibility of using the transient distance for determining sound intensities at large distances is assessed.