

## ДАЛЬНЕЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

**Б.К. Богушевич, Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа**

*Отделение гидроакустики МГИ НАН Украины, г. Одесса, Украина*

Рассматриваются вопросы распространения звука в приповерхностном подводном звуковом канале (ППЗК) северо-западной части Черного моря (СЗЧМ). Анализируются факторы вертикальной диффузии, рассеяния на поверхности и подповерхностном слое пузырьков, поглощения в среде и шумов среды. Определены характеристики ППЗК по месяцам, для пяти моделей каналов определены оптимальные частоты сигналов и дальности функционирования.

Questions of sound propagation in underwater subsurface sound channel in a northwest part of Black sea are considered. Factors of vertical diffusion, dispersion on the surface and subsurface bubble layer, environment absorption and environment noise are analyzed. Subsurface sound channel characteristics on months are determined, optimum frequencies of signals and range of functioning for five models of channels are determined.

Создание гидроакустических систем с большой дальностью функционирования является актуальной задачей для СЗЧМ. В отличие от глубоководных районов, в которых существуют благоприятные для распространения условия подводного звукового канала, в мелководных районах большую дальность функционирования в общем случае обеспечить не удастся. В этих районах для дальней акустической связи перспективным может оказаться использование ППЗК. Работа ставит целью определить периоды существования и характеристики ППЗК, оптимальные частоты сигналов и дальности распространения. Вопросы рассматриваются применительно к акватории с преобладающими глубинами 40м.

### 1 ХАРАКТЕРИСТИКИ ППЗК

Основными характеристиками ППЗК являются толщина слоя  $H_{сл}$ , вертикальный градиент скорости звука в слое  $g_1$ , условия его границ. Если слой простирается до дна, то условия нижней границы определяются дном. В иных случаях эти условия определяет градиент  $g_2$  нижележащего водного слоя. Верхняя граница ППЗК характеризуется взволнованной поверхностью и подповерхностным слоем пузырьков.

Анализ профилей скорости звука СЗЧМ базы данных ОГА МГИ позволил получить усредненные характеристики профиля для каждого месяца и оценить возможности формирования ППЗК. Условия канального распространения существуют в каждом из месяцев года. В весенне-летний период вероятность существования ППЗК 20...30%, осенью она увеличивается, и с октября по март приближается к 100%. Толщина слоя ППЗК с апреля по август около 10 м, увеличивается в сентябре-ноябре до 30 м, достигая дна (40 м) в декабре-марте. Усредненные значения характеристик ППЗК в разные месяцы года представлены в табл. 1. На их базе приняты пять моделей профилей, характеризующих условия распространения в определенные периоды (табл. 2).

Для описания верхней границы ППЗК проведен анализ поля ветра и волнения. Оценка волнения, проведенная на основании [1], позволила получить его средние значения в баллах с вероятностью существования не выше 50 и 20%. Анализ поля ветра, выполненный по [2], позволил получить значения силы ветра и им соответствующие значения волнения в баллах. Соотношения между волнением в баллах и высотой волны

трехпроцентной обеспеченности даются в [3]. Там же даны соотношения между высотой волны 3%-ной обеспеченности, средней высотой волны  $H_{cp}$  и среднеквадратичным отклонением поверхности,  $\sigma = 0,19H_{3\%} = 0,399H_{cp}$ ,  $H_{cp} = 0,476H_{3\%}$ , что позволяет найти значения средних высот волн, существующих не более 50 и 20% времени месяца (табл. 3).

Нижняя граница ППЗК характеризуется либо скоростью звука осадочного слоя дна, либо градиентом скорости звука нижележащего водного слоя. Анализ характеристик грунтов СЗЧМ позволяет заключить, что скорость звука в верхнем осадочном слое, как правило, больше, чем в придонном слое воды в периоды, когда слой достигает дна.

## 2 ОГРАНИЧЕНИЕ ЧАСТОТ, ПОТЕРИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ. ШУМЫ СРЕДЫ

### 2.1 Максимальная длина волны звука

Максимальная длина волны звука, захватываемого каналом, в общем случае, и в случае перемешанного слоя определяется выражениями [4]:

$$\lambda_{\max} = \frac{8}{3} \sqrt{2} \int_0^H \sqrt{n(z) - n(H_{cl})} dz, \quad \lambda_{\max} = 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot H_{cl}^{3/2} \quad (1)$$

где  $n(z)$  и  $n(H_{cl})$  - показатели преломления на глубине  $z$  и на границе слоя  $H_{cl}$ .

Для разных толщин перемешанного слоя допустимые значения частот следующие:

$H_{cl}$ , м	10	15	20	30	40
$f_{\min}$ , кГц ( $\lambda_{\max}$ , м)	5,58 (0,27)	3,04 (0,49)	1,97 (0,76)	1,07 (1,40)	0,70 (2,15)

### 2.2 Вертикальная диффузия

В случае «не очень малых» длин волн возникает утечка звука из канала (вертикальная диффузия), которая тем больше, чем больше длина волны, чем ближе точка заворота луча к нижней границе канала и чем меньше значение градиента скорости звука в слое. При этом происходит расщепление луча на два с точками заворота, сдвинутыми по вертикали и находящимися на глубинах одинаковых значений скорости звука, т.е. с двух сторон локального антиволновода [5]. Эта ситуация трактуется как эффект отражения и преломления волны, или явление прохождения волны через потенциальный барьер. Для описания поля в случае двух точек заворота используют модификации метода геометрической оптики. В работе [5] предложена модифицированная лучевая теория с использованием функций Вебера, по которой приближенная формула для модуля квадрата коэффициента отражения, справедливая вблизи оси антиволновода, имеет вид

$$V^2 = \frac{1}{1 + e^{\pi E}}, \quad E = \frac{2ik_0}{\pi} \int_{z_1}^{z_2} \sqrt{n^2(z) - \sin^2 \vartheta} dz \quad (2)$$

где,  $k_0$  - волновое число, соответствующее скорости звука на поверхности;

$\vartheta$  - угол падения звуковой волны.

### 2.3 Рассеяние звука на взволнованной поверхности

При отражении звука от неровной поверхности формируется когерентная и рассеянная компонента звукового поля. При малости величины параметра Рэлея

$P = 2k\sigma \cdot \sin \chi_0 = 4\pi \cdot \sin \chi_0 \cdot \sigma / \lambda < 1$ , в приближении метода малых возмущений (ММВ), для случая крупномасштабного изотропного волнения и скользящего падения звука ( $k\rho_0 \gg 1, k\rho_0 \cdot \cos^2 \vartheta_0 \ll 1, \sin \vartheta_0 \approx 1,0$ ,  $\rho_0$  - радиус корреляции неровностей), для спектра  $G(\Omega)$  Стрекалова коэффициент отражения в зеркальном направлении определяется [6]

$$V_k = 1 - 0,45 \cdot f^{3/2} \cdot H_{cp}^{3/2} \cdot \cos \vartheta_0. \quad (3)$$

При этом коэффициент затухания,  $\beta = (1 - V_k^2) / D_u$ , где  $D_u$  - длина цикла, будет равен [6]

$$\beta = 0,45 \cdot a \cdot f^{3/2} \cdot H_{cp}^{3/2} \text{ неп/м} \quad \text{или} \quad \beta = 1,954 \cdot 10^3 \cdot a \cdot f^{3/2} \cdot H_{cp}^{3/2}, \text{ дБ/км}, \quad (4)$$

где  $a = g / c_0$  - относительный градиент скорости звука.

Индикатриса рассеяния зависит от пространственного спектра волнения, вида коэффициента корреляции неровностей, их радиуса корреляции, длины волны и угла скольжения. Полуширина индикатрисы увеличивается с уменьшением угла для всех коэффициентов корреляции неровностей и для Гауссова коэффициента корреляции [6]

$$\Delta \vartheta = 2 / k\rho_0 \cdot \cos \vartheta_0 = 2 / k\rho_0 \cdot \sin \chi_0. \quad (5)$$

Величина  $\rho_0$  находится из выражения [3]  $\delta^2 = (\sigma / \rho_0)^2$ , где  $\delta^2$  - средний квадрат наклона поверхности (зависит от скорости ветра  $\delta^2 = (3 + 5,12v) \cdot 10^{-3}$ ). Для  $v = 10$  м/с  $\sigma \approx 0,5$  м и  $\rho_0 = 2,2$  м. При  $f = 1,0 \dots 3,0$  кГц и  $\chi_0 = 0,8 \dots 1,5^\circ$   $\Delta \vartheta = 160 \dots 900^\circ$ . Угол захвата энергии ( $\chi \approx 1,5^\circ \ll \Delta \vartheta$ ) мал, и практически вся рассеянная компонента поля уходит из канала.

#### 2.4 Рассеяние звука на подповерхностном слое воздушных пузырьков

Затухание звука в воде, содержащей пузырьки радиуса  $a$ , определяется [4]

$$\beta = 3,94 \cdot n \cdot \sigma_l \approx 3,94 \cdot n \cdot 4\pi a^2 \cdot (f / f_p)^4 \cdot (\delta / k_p \cdot a), \text{ дБ/м}, \quad (6)$$

где  $n$  - количество пузырьков в  $1 \text{ м}^3$ ;

$\sigma_l$  - поперечное сечение захвата - сумма сечений поглощения и рассеяния:  $\sigma_l = \sigma_a + \sigma_s$ ;

$f_p$  - резонансная частота пузырька,  $f_p \approx 3,26 / a$ ;

$\delta$  - постоянная демпфирования, для частот  $10 \dots 30$  кГц изменяется от  $0,05$  до  $0,08$  [4];

$k_p \cdot a = 2\pi f_p \cdot a / c$ , при  $f_p \approx 3,26 / a$   $k_p \cdot a = 0,0136$ .

При разных размерах пузырьков коэффициент затухания ( $\delta \approx 0,06$ ) определяется суммой:

$$\beta \approx 3,94 \cdot 4\pi \cdot 4,41 \cdot f^4 \cdot \sum_i n_i \cdot a_i^2 / f_{pi}^4 = 218,3 \cdot f^4 \cdot \sum_i n_i a_i^2 / f_{pi}^4, \text{ дБ/м}. \quad (7)$$

Распределение пузырьков по размерам и зависимость их концентрации от глубины принимается по [7]. При этом коэффициент затухания на разных частотах равен:

$f$ , кГц	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$\beta(f)$ , дБ/км	0,01	0,035	0,086	0,178	0,330	0,563

Для расчетов принимается модель слоя, в первую очередь, учитывающая пузырьки  $a \geq 1,7 \cdot 10^{-2}$  см, - толщина слоя  $H_{cl} = 3,0$  м, концентрация пузырьков в слое неизменна.

### 2.5 Поглощение и рассеяние при распространении

На частотах более 2,0 кГц основной вклад в затухание вносит поглощение, определяемое релаксацией бора на частотах до 3,0 кГц и релаксацией  $MgSO_4$  на больших частотах. Звук ослабляется и из-за рассеяния на неоднородностях, роль температурных неоднородностей усиливается на более низких частотах. Усредняя данные разных источников [3, 4], получим следующие значения коэффициентов затухания:

$f$ , кГц	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$\beta(f)$ , дБ/км	0,07	0,10	0,12	0,14	0,17	0,19	0,22

### 2.6 Уровень шумов среды

Основными источниками шумов частот 1...4 кГц являются динамические шумы приповерхностного слоя и шумы удаленного судоходства [8]. Спектральные характеристики шумов глубоководных районов приводятся в работах [4, 8]. В мелководных районах из-за благоприятных условий распространения уровень шума может оказаться выше [4]. Принимаемые значения уровней шумов (для  $v = 10$  м/с) на частотах 1,0, 1,5, 2,0, 3,0 и 4,0 кГц - 60 (63), 57 (59), 54 (55), 52 и 49 дБ относительно  $1 \text{ мкПа} / \sqrt{\text{Гц}}$ .

## 3 РАСЧЕТЫ И ОЦЕНКИ

При расчетах акустическая мощность сигнала принималась  $P_a = 100$  Вт, направленность излучателя  $K_p \approx 3,0$ , давление на его оси на расстоянии 1 м -  $10 \cdot 10^3$  Па.

Первая модель. При расстоянии  $r = 100$  км и  $z_u = z_{np} = 10$  м существует 115 разрешенных лучей ( $N_d = 115$ ), интервал времени прихода сигналов  $L = 18,37$  мс, длительности элемента сигнала  $T_s = 40$  мс, полоса приема  $\Delta f_{np} = 25$  Гц. При частоте сигнала  $f = 1,0$  кГц потери рассеяния на слое пузырьков чрезвычайно малы, потери на затухание 7 дБ, потери рассеяния на поверхности 3,1 и 10,1 дБ, отношения сигнал/шум (ОСШ), существующие более 50% и 80% времени месяца, 33,55 дБ и 26,55 дБ, функционирование систем ~95% времени месяца. При увеличении  $r$  со 100 до 180 км  $L = 34,40$  мс,  $T_s = 70$  мс,  $\Delta f_{np} = 15$  Гц, выигрыш от уменьшения  $\Delta f_{np}$  2,2 дБ, увеличение потерь на затухание 12,6 дБ, рассеяния на поверхности 5,6 и 18,2 дБ, результирующее увеличение потерь 5,9 и 11,5 дБ, а итоговое ОСШ 27,7 дБ и 15,1 дБ, функционирование систем 82...85% времени месяца. В случае  $r = 180$  км и  $f = 0,5$  кГц улучшение ОСШ 5,8 и 14,1 дБ, функционирование систем ~95% времени месяца.

Вторая модель. При  $r = 100$  км  $N_d = 184$ ,  $L = 45,49$  мс,  $T_s = 100$  мс,  $\Delta f_{np} = 9$  Гц, потери на поверхности возрастают до 5,82 и 21,8 дБ, изменение показателей +3,8 дБ и -5,3 дБ, значение ОСШ 37,3 и 21,3 дБ, работа систем ~85% времени. При понижении  $f$  с 1,0 до 0,5 кГц уменьшаются потери на поверхности и работа систем ~98% времени. А при  $r = 180$  км и  $f = 0,5$  кГц ОСШ=23,5 дБ ( $P \geq 80\%$ ) и функционирование ~90% времени.

Третья модель. При  $r = 100$  км и  $z_u = z_{np} = 10$  м,  $N_d = 156$  и  $L = 30,75$  мс. При  $f = 1,0$  кГц потери на диффузию ~6,5 дБ, общее ухудшение 7,2 дБ, ОСШ 30,1 и 14,1 дБ, работа в течение ~82% времени. Повышение  $f$  с 1,0 до 1,5 кГц, значительно (на 18,3 дБ) увеличивает потери на поверхности, а уменьшение  $f$  с 1,0 до 0,5 кГц существенно (на

10,5 дБ) увеличивает потери на диффузию. В этой ситуации оптимально  $f = 0,7 \dots 0,8$  кГц, при котором дальность ( $P \geq 80\%$ ) может быть увеличена до  $\sim 120$  км.

Четвертая модель. При  $r = 70$  км и  $z_u = z_{np} = 7$  м  $N_l = 78$ ,  $L = 5,28$  мс,  $T_s = 10$  мс и  $\Delta f_{np} = 100$  Гц. При  $f = 2,0$  кГц потери на диффузию  $\sim 12$  дБ, потери рассеяния на пузырьках (глубина эффективного распространения звука до 9,0 м)  $\Pi = \beta r / 3 = 0,8$  дБ, потери на затухание 8,4 дБ, потери на поверхности 2,6 и 8,8 дБ, ОСШ 23,2 и 17,0 дБ, работа  $\sim 85\%$  времени месяца. Здесь потери на диффузию близки потерям рассеяния на поверхности, что характеризует значение  $f = 2,0$  кГц как близкое к оптимальному.

Пятая модель. При  $r = 50$  км и  $z_u = z_{np} = 3,5$  м  $N_l = 80$  и  $L = 2$  мс,  $T_s = 5$  мс и  $\Delta f_{np} = 100$  Гц. При  $f = 4,0$  кГц потери на вертикальную диффузию  $\sim 26$  дБ, потери рассеяния на воздушных пузырьках (глубина эффективного распространения звука до 4,5 м)  $\Pi = (2/3)\beta r = 18,7$  дБ, потери на затухание 11 дБ, потери рассеяния на поверхности 3,6 и 13,3 дБ, ОСШ -3,3 и -13,0 дБ, работа систем невозможна. Здесь изменение  $f$  не меняет ситуацию, и ожидаемая дальность функционирования  $\sim 30$  км при 80% времени работы.

## ВЫВОДЫ

С апреля по август ППЗК неустойчив, как по времени существования, так и по толщине слоя, достигаемая дальность 20...40 км при частотах сигнала 3,0-5,0 кГц. С сентября по ноябрь вероятность существования ППЗК увеличивается с 72 до 100%, толщина слоя – с 17 до 30 м, дальность 50...120 км при частотах 0,8...2,0 кГц. С декабря по март вероятность существования близка к 100%, толщина слоя максимальна, дальность 120...200 км при частотах 0,5...1,0 кГц.

Основными факторами, определяющими дальность связи, являются вертикальная диффузия и рассеяние на взволнованной поверхности. А основными характеристиками ППЗК, определяющими эту дальность, являются толщина слоя и высота волнения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.К. Леонов. Региональная океанография. Ч. 1. – Л.: Гидрометиздат, 1960.
2. Атлас волнения и ветра Черного моря. – Л.: Гидрометиздат, 1969.
3. Н.С. Агеева и др. Океанологические характеристики, важные для акустики океана// Акустика океана. – М.: Наука, 1974. – С. 5-78.
4. Р. Дж. Урик. Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978. – 444 с.
5. Murphy E.L., Davis J.A. Modified ray theory for bounded media.// J. Acoust. Soc. Am. – 1974. – **56**, №6 – Р. 1747-1760.
6. Ю.П. Лысанов. Рассеяние звука неровными поверхностями.// Акустика океана. – М.: Наука, 1974. – С. 231-330.
7. П.А. Колобаев. Исследование концентрации и статистического распределения размеров пузырьков, создаваемых ветром в приповерхностном слое океана// Океанология. – 1975. – **15**, №6 – С. 1013-1017.
8. Б.Ф. Курьянов. Подводные шумы океана// Акустика океана. Современное состояние. – М.: Наука, 1982. – С. 164-174.

Таблица 1 – Усредненные значения характеристик ППЗК

Месяц	Вероятность существования канала $P_k$ , %		Толщина слоя $H_{сл}$ , м	Значение градиента СЗ в слое $g_1$ , 1/с	Значение градиента СЗ под слоем $g_2$ , 1/с
Январь	100		40	0,037	-
Февраль	91	76	40	0,046	-
		15	15	0,028	-0,083
Март	83		40	0,049	-
Апрель	83		10	0,01	-0,070
Май	27		13	0,019	-0,453
Июнь	24		9	0,078	-0,444
Июль	30		8	0,047	-1,846
Август	59		11	0,049	-2,792
Сентябрь	72		17	0,035	-1,634
Октябрь	90		22	0,056	-2,752
Ноябрь	100		30	0,053	-0,782
Декабрь	100	36	28	0,073	-0,383
		64	40	0,123	-

Таблица 2 - Вариант профиля, характеристики, период применимости

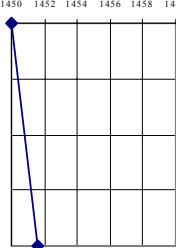
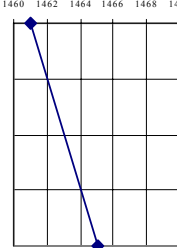
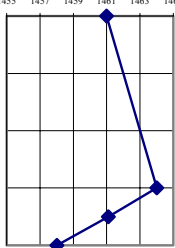
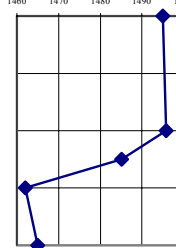
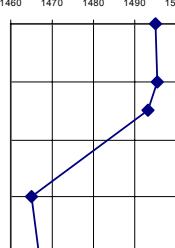
1	2	3	4	5
 <p><math>c_0=1450</math> м/с <math>g_1=0,04</math> 1/с <math>H_{сл}=40</math> м</p> <p>Январь-март</p>	 <p><math>c_0=1461</math> м/с <math>g_1=0,1</math> 1/с <math>H_{сл}=40</math> м</p> <p>Декабрь</p>	 <p><math>c_0=1461</math> м/с <math>g_1=0,1</math> 1/с <math>H_{сл}=30</math> м <math>g_2=-0,58</math> 1/с</p> <p>Ноябрь, декабрь</p>	 <p><math>c_0=1495</math> м/с <math>g_1=0,04</math> 1/с <math>H_{сл}=20</math> м <math>g_2=-2,13</math> 1/с</p> <p>Сентябрь, октябрь</p>	 <p><math>c_0=1495</math> м/с <math>g_1=0,04</math> 1/с <math>H_{сл}=10</math> м <math>g_2=0,4</math> 1/с</p> <p>Апрель-август</p>

Табл. 3 – Средние по месяцам значения характеристик ветрового волнения СЗЧМ

Месяц		9	10	11	12	1	2
Волнение по [19], баллы	$P \leq 50$	2,4	3,1	3,4	3,5	4,0	3,4
	$P \leq 20$	3,9	4,7	5,1	5,2	5,5	5,0
Ветер по [20], баллы	$P \leq 50$	3,1	3,7	4,2	4,3	4,4	4,6
	$P \leq 20$	4,8	5,4	5,7	5,8	6,0	6,2
Волнение, соответствующее ветру [20], баллы	$P \leq 50$	2,1	2,7	3,2	3,3	3,4	3,6
	$P \leq 20$	3,8	4,4	4,7	4,8	5,0	5,2
Волнение, принимаемое для расчетов, баллы	$P \leq 50$	2,3	3,0	3,3	3,4	3,8	3,5
	$P \leq 20$	3,9	4,6	5,0	5,1	5,3	5,1
Высота волны 3%-ной обеспеченности, м	$P \leq 50$	0,65	1,0	1,15	1,20	1,45	1,25
	$P \leq 20$	1,55	2,15	2,75	2,90	3,20	2,90
Средняя высота волны $H_{cp}$ , м	$P \leq 50$	0,31	0,48	0,55	0,57	0,69	0,60
	$P \leq 20$	0,74	1,02	1,31	1,38	1,52	1,38