

УДК 534.88

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И АКУСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ЛЕДОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 1995 г. И. А. Александров

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

Поступила в редакцию 24.02.94 г.

Обоснована возможность построения пространственной модели ледяного покрова, представляющей собой последовательность зон с постоянными базовыми параметрами льда (сплоченность, толщина, размеры льдин). Приведена акустическая модель поверхности, образованной молодыми и однолетними льдами в форме крупнобитых льдов, обломков ледяных полей и больших ледяных полей. Кратко описана методика моделирования на ЭВМ ледовой поверхности по заданной пространственной модели. Приведены примеры "реализаций" водно-ледовой поверхности, ледяной покров которой образован двумя типами льдов с постоянными базовыми параметрами. Предложена классификация ледовых поверхностей по степени их акустической однородности, основанная на масштабе интервала усреднения коэффициентов отражения звука.

При расчетах подводных звуковых полей явно или неявно учитывается акустическая модель поверхности, характеризующая ее отражающие свойства. В свою очередь, акустические свойства поверхности определяются прежде всего ее пространственной моделью, т.е. совокупностью геометрических характеристик поверхности.

При акустическом моделировании свободной морской поверхности ее геометрические характеристики предполагаются постоянными на всей протяженности акустической трассы (в случае нерегулярных поверхностей постоянство понимается в статистическом смысле). Тогда коэффициент отражения звука от нее не изменяется вдоль трассы, т.е. поверхность является акустически однородной. Такая модель свободной морской поверхности во многих практически важных случаях физически вполне оправдана.

Совершенно иная ситуация имеет место в случае ледовой поверхности. Вследствие различия гидрометеорологических условий образования морского льда, его физико-химические свойства и пространственная структура характеризуются значительной неоднородностью и сезонной изменчивостью [1, 2]. Для развитого ледяного покрова характерно чередование ледовых и водных участков, а внутри ледовых участков – чередование льдов различной протяженности и толщины.

В еще большей степени это характерно для диффузной ледовой кромки, представляющей собой, по определению О.И. Дьячка [3], промежуточную область между чистой водой и сплошным ледяным покровом, в которой плавно, на протяжении десятков километров, увеличиваются как сплоченность льда (от 1 до 7 - 8 баллов), так и

размеры льдин и толщина льда. В отличие от диффузной, в компактной кромке переход от воды ко льду происходит резко, практически без промежуточных градаций по сплоченности и другим характеристикам льда.

В настоящей работе построена пространственная модель ледовых поверхностей, не содержащих крупных локальных неоднородностей типа больших одиночных торосов и айсбергов. Геометрические характеристики таких поверхностей определяются сплоченностью льда, размерами льдин, толщиной льда и рельефом его нижней границы. Кроме того, необходимо также учитывать наличие протяженных участков чистой воды, влияющих на результирующую отражательную способность поверхности (главным образом в районах ледовой кромки). Классификация морских льдов по сплоченности, возрастным видам (толщине), формам (размерам льдин) дана в работе [4]. Общепринятая классификация морских льдов по рельефу нижней границы отсутствует. Предложения по такой классификации, основанной на различиях в отражательной способности негладких льдов, сформулированы в работе [5].

Для построения пространственной и, соответственно, акустической моделей ледовой поверхности предлагается выделять участки ледовой поверхности (зоны), в пределах которых сохраняются практически неизменными основные, базовые параметры ледяного покрова: возрастные виды (толщины) льда, их сплоченности и формы (размеры ледовых участков). Каждая зона характеризуется средним коэффициентом отражения звука (интервал усреднения – протяженность зоны). Таким образом, акустически неоднородная

Таблица 1. Структура акустической модели ледовой поверхности

Формы льда		Протяженность зоны, км			
		$D_1$	$D_2$	...	$D_n$
Битый лед	Сплоченность	$S_{11}$	$S_{21}$	...	$S_{n1}$
	Размеры льдин	$L_{11}^{\min} - L_{11}^{\max}$	$L_{21}^{\min} - L_{21}^{\max}$	...	$L_{n1}^{\min} - L_{n1}^{\max}$
	Толщина льда	$h_{11}^{\min} - h_{11}^{\max}$	$h_{21}^{\min} - h_{21}^{\max}$	...	$h_{n1}^{\min} - h_{n1}^{\max}$
Обломки ледяных полей	Сплоченность	$S_{12}$	$S_{22}$	...	$S_{n2}$
	Размеры льдин	$L_{12}^{\min} - L_{12}^{\max}$	$L_{22}^{\min} - L_{22}^{\max}$	...	$L_{n2}^{\min} - L_{n2}^{\max}$
	Толщина льда	$h_{12}^{\min} - h_{12}^{\max}$	$h_{22}^{\min} - h_{22}^{\max}$	...	$h_{n2}^{\min} - h_{n2}^{\max}$
Ледяные поля	Сплоченность	$S_{13}$	$S_{23}$	...	$S_{n3}$
	Размеры льдин	$L_{13}^{\min} - L_{13}^{\max}$	$L_{23}^{\min} - L_{23}^{\max}$	...	$L_{n3}^{\min} - L_{n3}^{\max}$
	Толщина льда	$h_{13}^{\min} - h_{13}^{\max}$	$h_{23}^{\min} - h_{23}^{\max}$	...	$h_{n3}^{\min} - h_{n3}^{\max}$
Средн. по зоне коэффициент отраж. звука	$\overline{R_i^{\text{TP}}} = \sum R_j^{\text{кор}} \cdot S_j$	$\overline{R_1^{\text{TP}}}(\varphi)$	$\overline{R_2^{\text{TP}}}(\varphi)$	...	$\overline{R_n^{\text{TP}}}(\varphi)$

поверхность заменяется кусочно-однородной, состоящей из конечного числа следующих друг за другом зон, в пределах которых коэффициент отражения постоянен, но изменяется от зоны к зоне. Такой прием широко используется в гидроакустике, например, при задании вертикальных профилей скорости звука в воде, параметров грунта, льда и т.д.

Тогда пространственная модель ледовой поверхности (в общем случае водно-ледовой) может быть представлена в виде таблицы последовательности зон протяженностью  $D_i$ , в которых заданы следующие характеристики ледяного покрова: размеры льдин  $\Delta L_{ij} = L_{ij}^{(\min)} - L_{ij}^{(\max)}$ , сплоченности  $S_{ij}$  каждой из форм льда и толщины льда  $\Delta h_{ij} = h_{ij}^{(\min)} - h_{ij}^{(\max)}$ ; индекс  $i$  характеризует номер зоны, индекс  $j$  — форму льда.

Учет в пространственной модели тех или иных возрастных видов и форм льда в значительной степени определяется диапазоном частот используемых гидроакустических средств. Так, в "килогерцовом" диапазоне основное влияние на формирование акустического поля подо льдом оказывают однолетние и старые крупнобитые льды, обломки ледяных полей и ледяные поля. В ультразвуковом диапазоне необходимо учитывать также отражательную способность молодых (толщиной до 30 см) мелкобитых льдов. При построении акустической модели к пространственной модели добавляется классификация по коэффициенту отражения звука, усредненному по

протяженности зоны. Структура акустической модели ледовой поверхности в общем виде представлена в табл. 1. Такое представление пригодно как для сплошного ледяного покрова, так и для водно-ледовой поверхности, в частности, для районов ледовой кромки. В частном случае, когда базовые параметры ледяного покрова постоянны по всей длине акустической трассы, число зон  $n = 1$ . Выделенная штриховой линией часть табл. 1 относится к пространственной модели ледовой поверхности.

Рассмотрим более подробно приведенный в последней строке табл. 1 средний по трассе в  $i$ -й зоне коэффициент отражения звука  $\overline{R_i^{\text{TP}}}$ . Если сплоченность льда  $j$ -й формы равна  $S_{ij}$  баллов, то

$$\overline{R_i^{\text{TP}}}(\varphi) = 0.1 \sum_{j=1}^N \hat{R}_{ij}^{\text{кор}}(\varphi) S_{ij}, \quad (1)$$

где

$$\hat{R}_{ij}^{\text{кор}}(\varphi) = \hat{R}_{ij}^{\text{гл}}(\varphi) \exp(-0.5 R_e^2). \quad (2)$$

Здесь  $\hat{R}_{ij}^{\text{гл}}(\varphi)$  — коэффициент отражения звука от гладкого льда в  $i$ -й зоне для  $j$ -го возрастного вида льда;  $R_e$  представляет собой параметр Рэлея. Значок  $\hat{\phantom{x}}$  означает усреднение по толщинам льда данного возрастного вида, а также по физическим параметрам льда, определяющим его отражающую способность; более подробно этот вопрос рассмотрен в работе [6].

В общем случае водно-ледовой поверхности формула (1) принимает вид:

$$\overline{R_i^{TP}(\varphi)} = 0.1 \left[ R^B(\varphi) S_i^B + \sum_{j=1}^N \hat{R}_{ij}^{кор}(\varphi) S_{ij} \right], \quad (3)$$

где  $R^B(\varphi)$ ,  $S_i^B$  – коэффициент отражения звука от водной поверхности и суммарная доля (“сплоченность”) участков чистой воды в  $i$ -й зоне соответственно. При наличии льда водная поверхность обычно достаточно гладкая, поэтому в относительно узком интервале углов скольжения, представляющем наибольший интерес с точки зрения распространения звука,  $R^B \approx 1$ . Учитывая, что  $S_i^B = 10 - S_i$ , где  $S_i = \sum_{j=1}^N S_{ij}$  – суммарная сплоченность всех  $N$  возрастных видов льдов в  $i$ -й зоне, для общего случая водно-ледовой поверхности получим:

$$\overline{R_i^{TP}(\varphi)} \approx 0.1 \left[ 10 - S_i + \sum_{j=1}^N \hat{R}_{ij}^{кор}(\varphi) S_{ij} \right]. \quad (4)$$

Входящая в параметр Рэлея  $R_e$  среднеквадратичная высота неровностей нижней границы льда  $\sigma$  может быть определена экспериментально. Обработка результатов натурных измерений в [7] на старых льдах Центрального Арктического бассейна позволяет получить приближенные соотношения, связывающие  $\sigma$  с толщиной льда  $h$ :

$$\sigma \approx \begin{cases} 1.04 + 0.6h, & h > 2 \text{ м}, \\ 0.06h, & h \leq 2 \text{ м}. \end{cases} \quad (5)$$

В качестве иллюстрации в табл. 2 приведена акустическая модель ледовой поверхности для реального случая; как и в табл. 1, штриховыми линиями выделена пространственная модель поверхности. В первой зоне (0 - 26 км) ледяной покров образован тонким однолетним льдом ( $\Delta h_{11} = 0.3 - 0.7$  м) в форме обломков ледяных полей ( $\Delta L_{11} = 100 - 500$  м) сплоченностью  $S_{11} = 6$  баллов, а также молодыми льдами ( $\Delta h_{12} = 0.15 - 0.3$  м), в форме больших ледяных полей ( $\Delta L_{12} = 0.5 - 2.0$  км) сплоченностью  $S_{12} = 4$  балла. Во второй зоне (26 - 37 км) – тонким однолетним льдом ( $\Delta h_{21} = 0.3 - 0.7$  м) в форме обломков ледяных полей ( $\Delta L_{21} = 100 - 500$  м) сплоченностью  $S_{21} = 4$  балла, а также средним однолетним льдом ( $\Delta h_{22} = 0.7 - 1.2$  м) в форме больших ледяных полей ( $\Delta L_{22} = 0.5 - 2.0$  км) сплоченностью  $S_{22} = 6$  баллов. В третьей зоне (>37 км) – тонким однолетним льдом ( $\Delta h_{31} = 0.3 - 0.7$  м) в форме крупнобитого льда ( $\Delta L_{31} = 20 - 100$  м) сплоченностью  $S_{31} = 2$  балла, а также толстым однолетним льдом ( $\Delta h_{32} = 1.2 - 2.0$  м) в форме больших ледяных полей ( $\Delta L_{32} = 0.5 - 2.0$  км) сплоченностью  $S_{32} = 8$  баллов.

На рис. 1 приведены полученные в соответствии с формулой (2) функции  $\hat{R}_{ij}^{кор}(\varphi)$  для тонкого,

Таблица 2. Акустическая модель ледовой поверхности

Параметры	Протяженность зоны, км		
	0 - 26	26 - 37	>37
Крупнобитый лед			
$S$ , б	–	–	2
$\Delta L$ , м	–	–	20 - 100
$\Delta h$ , м	–	–	0.3 - 0.7
Обломки ледяных полей			
$S$ , б	6	4	–
$\Delta L$ , м	100 - 500	100 - 500	–
$\Delta h$ , м	0.3 - 0.7	0.3 - 0.7	–
Ледяные поля			
$S$ , б	4	6	8
$\Delta L$ , м	500 - 2000	500 - 2000	500 - 2000
$\Delta h$ , м	0.15 - 0.30	0.7 - 1.2	1.2 - 2.0
Средний по зоне коэфф. отражения звука			
$\varphi$ , град	$R_1^{TP}(\varphi)$	$R_2^{TP}(\varphi)$	$R_3^{TP}(\varphi)$
1	0.999	0.997	0.995
3	0.996	0.989	0.973
5	0.992	0.976	0.937
7	0.986	0.958	0.889
11	0.972	0.912	0.767
15	0.954	0.852	0.628
19	0.930	0.782	0.499
23	0.897	0.702	0.385
27	0.775	0.562	0.264

среднего и толстого однолетнего льда на частоте  $f = 5$  кГц. Коэффициент отражения  $R_i^{TP}(\varphi)$  определялся по формуле (2), поскольку ледяной покров во всех зонах являлся сплошным ( $S_i = 10$  баллов). Значения коэффициента отражения в диапазоне углов скольжения  $1^\circ - 27^\circ$  приведены в нижней части табл. 2. Средние по зонам коэффициенты когерентного отражения звука при углах скольжения  $\varphi > 5^\circ$  (в этом случае результаты расчетов достаточно достоверны, так как не учитываемые здесь эффекты затенения, уже, по-видимому, не сказываются или, по крайней мере, ослаблены) заметно отличаются друг от друга, что, естественно, повышает точность расчетов звуковых полей по сравнению со случаем усреднения коэффициентов отражения по всей длине акустической трассы.

Представленная в табл. 1 пространственная модель ледовой поверхности позволяет осуществить ее компьютерное моделирование при следующих допущениях: 1) горизонтальные размеры

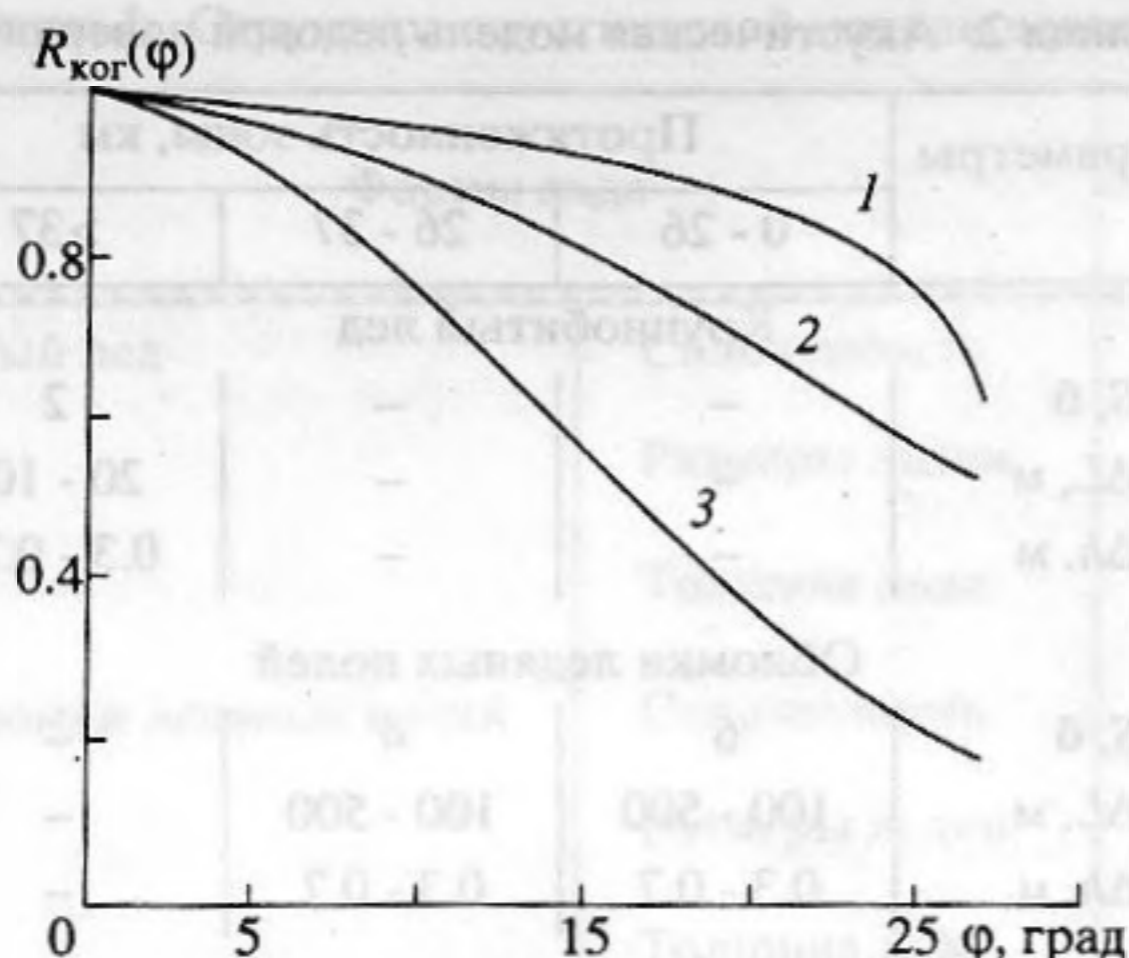


Рис. 1. Коэффициенты когерентного отражения звука от однолетних льдов при  $f = 5$  кГц: 1 – тонкий лед, 2 – средний лед, 3 – толстый лед.

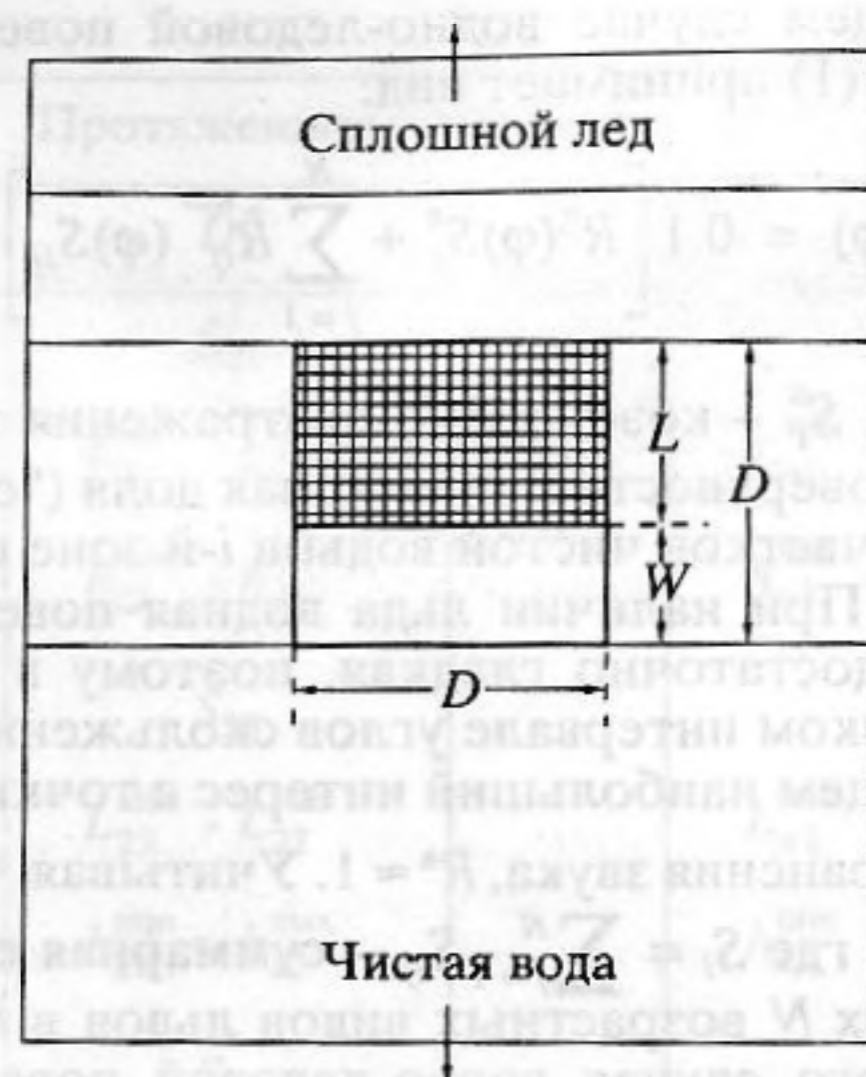


Рис. 2. Схема зональной структуры водно-ледовой поверхности в районе ледовой кромки.

льдин в интервале  $\Delta L_{ij} = L_{ij}^{\min} - L_{ij}^{\max}$  и толщины льда в интервале  $\Delta h_{ij} = h_{ij}^{\min} - h_{ij}^{\max}$  являются случайными величинами с известными законами распределения вероятностей; 2) ледовые и водные участки поверхности, если последние имеются, перемешаны случайным образом. Для моделирования на ЭВМ ледяной покров по его пространственной модели следует сформировать последовательность случайных чисел, каждое из которых представляет собой длину отрезка ледового или водного участка поверхности.

Расчеты приведем для одной зоны, так как в каждой зоне они одинаковы, а для ледяного покрова в целом результаты по зонам накапливаются.

Ледовый участок, помимо горизонтального размера  $L$ , должен характеризоваться также толщиной  $h$  и среднеквадратичной высотой неровностей  $\sigma$ , водные участки рассматриваются как элементы поверхности с нулевыми значениями  $h$  и  $\sigma$ . Общая длина всех ледовых отрезков в зоне определяется суммарной сплоченностью льдов всех возрастных видов. Действительно, рассмотрим зональную схему ледовой поверхности (рис. 2). Мысленно выделим в произвольно выбранной зоне квадрат со стороной, равной ширине зоны  $D$ . Для определенности будем считать, что ледяной покров образован льдами одного типа, сплоченность которых  $S < 10$  баллов, т.е. в зоне имеются и ледовые и водные участки. Соберем весь лед внутри квадрата в полосу шириной  $L$  (на рисунке – заштрихованная часть квадрата). Согласно определению сплоченности  $S = LD/D^2$ , откуда  $L = SD$ . Если в зоне находится несколько типов льда, то для каждого из них справедливо соотношение типа  $L_j = S_j D$ ; при этом  $\sum L_j = L$ . Ширину полосы свободной от

льда части квадрата обозначим  $W$ ; как видно из рисунка,  $W = D - L$ .

Численное моделирование ледяного покрова осуществляется следующим образом:

1. По известному закону распределения вероятностей размеров льдин  $P(L)$  генерируется последовательность случайных чисел  $L_j$ , удовлетворяющих условиям:

$$L_j^{\min} \leq L_j \leq L_j^{\max}; \quad \sum_j L_j = L. \quad (6)$$

2. По известному закону распределения вероятностей толщин льда  $P(h)$  генерируется последовательность случайных чисел  $h_j$ , удовлетворяющих условию:

$$h_j^{\min} \leq h_j \leq h_j^{\max}. \quad (7)$$

3. Для каждого  $h_j$  по формулам (5) определяются значения  $\sigma_j$ . Массивы значений  $h_j$  и  $\sigma_j$  ставятся в соответствие массиву  $L_j$ .

4. Генерируется последовательность случайных чисел  $W_j$ , удовлетворяющих условиям:

$$W_j^{\min} \leq W_j \leq W_j^{\max}; \quad \sum_j W_j = W. \quad (8)$$

5. Случайные числа  $L_j$  и  $W_j$ , занесенные в один массив, перемешиваются случайным образом.

Управляя работой датчика случайных чисел, можно формировать различные последовательности случайных чисел  $L_j$ ,  $W_j$ , т.е. “реализации” ледяного покрова с заданными базовыми параметрами  $S$ ,  $h$ ,  $L$ . В качестве примера на рис. 3 приведены полученные описанным выше способом

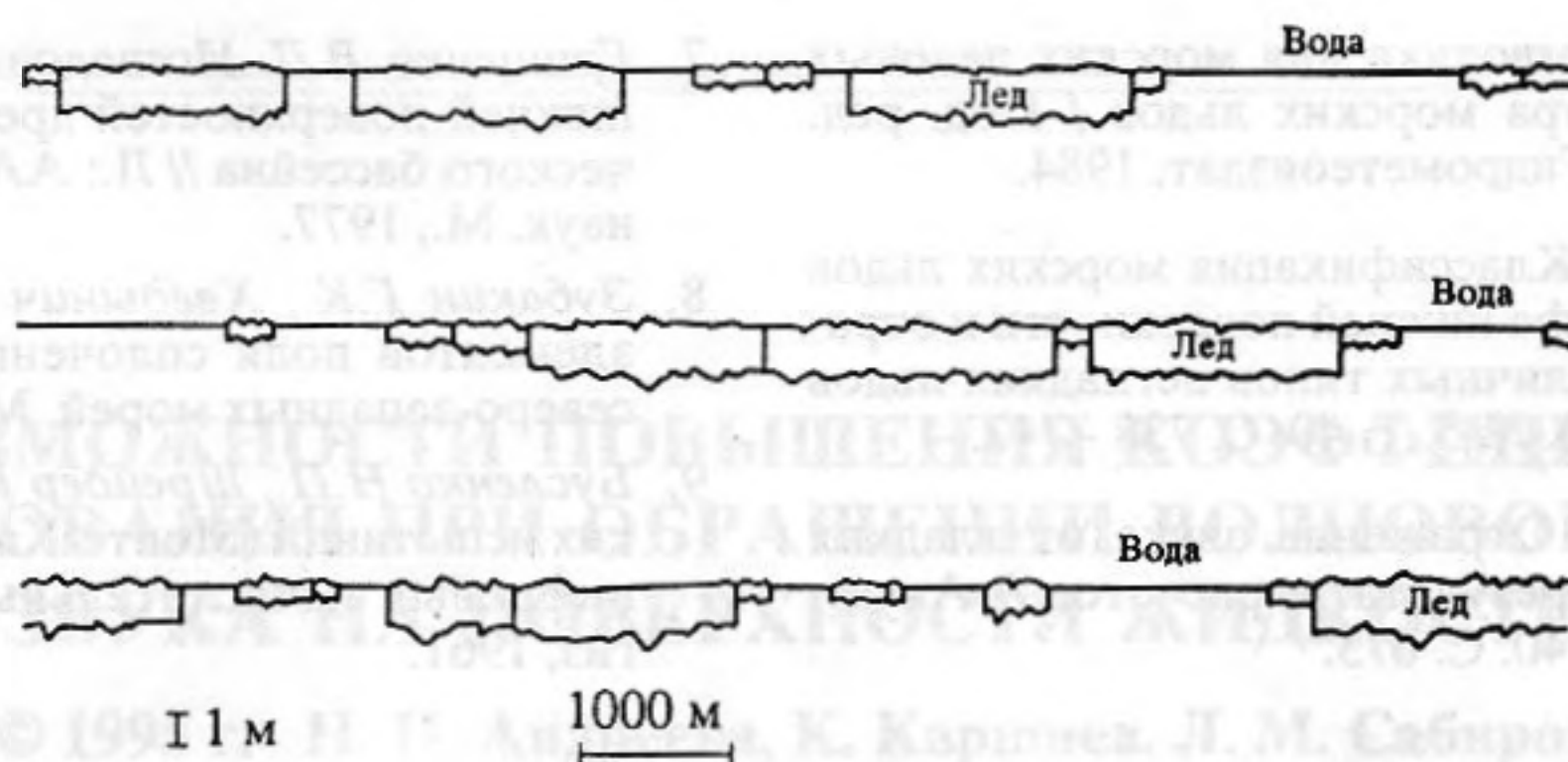


Рис. 3. Фрагменты "реализаций" водно-ледовой поверхности, полученные методом машинного моделирования.

численные "реализации" водно-ледовой поверхности для случая, когда ледовый покров образован льдами двух типов со следующими базовыми параметрами: 1)  $S_1 = 2$  балла,  $\Delta h_1 = 0.3 - 0.7$  м,  $\Delta L_1 = 100 - 500$  м,  $D = 10$  км; 2)  $S_2 = 5$  баллов,  $\Delta h_2 = 1.2 - 2.0$  м,  $\Delta L_2 = 0.5 - 2.0$  км,  $D = 10$  км.

О функции  $P(L)$  известно лишь, что она является монотонно убывающей [8]. В наших расчетах использовались экспоненциальная и степенная функции:

$$P_1(L) = \exp(-nL), \quad P_2(L) = (L)^{-n}. \quad (9)$$

Для генерирования случайных совокупностей с заданными законами распределения вероятностей использовалась методика, описанная в работе [9]: если случайная величина  $X$  подчинена закону распределения вероятностей  $P(X)$ , то случайная величина

$$R_i = \int_{-\infty}^x P(X)dX \quad (10)$$

распределена равномерно на интервале  $[0, 1]$ . Решая уравнение (10) с подынтегральными выражениями типа (9) и пределами интегрирования от  $L_{\min}$  до  $L_{\max}$ , получим следующие выражения для  $L_j$ :

$$L_{j1} = L_{\min} - n^{-1} \ln \{ 1 - \{ 1 - \exp[-n(L_{\max} - L_{\min})] \} R_i \},$$

$$L_{j2} = L_{\min} \{ 1 - [1 - (L_{\max}/L_{\min})^{1-n}] R_i \}^{1/(1-n)}. \quad (11)$$

Подставляя в выражения (11) граничные значения  $R_i$ , т.е. 0 и 1, легко убедиться, что они соответствуют значениям  $L_{\min}$  и  $L_{\max}$ . Проверка на ЭВМ показала хорошее совпадение экспериментальных распределений  $P(L)$  с теоретическими. Распределения вероятностей случайных величин  $h_j$  и  $W_j$  принимались равномерными.

"Реализации" ледовой поверхности представляют собой зафиксированные последовательности льдин и водных участков для водно-ледовой поверхности или ледовых участков со льдами различных типов в случае сплошного ледяного покрова. Так как коэффициент отражения звука от

конкретной льдины или однородного ледового участка является, по существу, средним для данной льдины (ледового участка), то можно, в дополнение к рассмотренным выше двум масштабам пространственного усреднения, говорить о масштабе усреднения коэффициентов отражения звука, равном размеру льдины или водного участка.

Таким образом, в зависимости от решаемой задачи и конкретных условий может быть выбран один из трех возможных масштабов пространственного усреднения отражательных свойств ледовой поверхности, или, другими словами, тип акустической модели поверхности.

1. Акустически однородная поверхность (усреднение отражательных свойств производится по всей длине акустической трассы).
2. Акустически кусочно-однородная поверхность (усреднение отражательных свойств производится по протяженности зоны – участку трассы с постоянными базовыми характеристиками ледяного покрова).
3. Акустически дискретно-неоднородная поверхность (учитываются коэффициенты отражения звука от каждой отдельной льдины или водного участка).

В заключение автор выражает благодарность С.Б. Саморукову за полезное обсуждение результатов работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородачев В.Е., Волков Н.А., Грищенко В.Д. Особенности пространственной структуры ледяного покрова Северного Ледовитого океана и ее сезонная изменчивость // Труды ААНИИ. 1981. Т. 372. С. 35 - 43.
2. Черепанов Н.В., Федотов В.И. Пространственная неоднородность строения ледяного покрова // Труды ААНИИ. 1985. Т. 396. С. 46 - 52.
3. Diachok O.I. Hydroacoustics in Arctic Ocean // Cool Regions, Science and Technology. 1980. № 2. 1985.

4. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов / Под. ред. Крутских Б.А. Л.: Гидрометеониздат, 1984.
5. Александров И.А. Классификация морских льдов по характеру рельефа нижней поверхности и отражение звука от различных типов негладких льдов // Акуст. журн. 1994. № 5. Т. 40. С. 738 - 742.
6. Александров И.А. Отражение звука от гладких льдов: методика и результаты расчетов // Акуст. журн. 1994. № 4. Т. 40. С. 673.
7. Грищенко В.Д. Исследование рельефа верхней и нижней поверхностей дрейфующих льдов Арктического бассейна // Л.: ААНИИ. Дис. ... канд. физ. наук. М., 1977.
8. Зубакин Г.К., Хведынич С.В. Численная оценка элементов поля сплоченности ледяного покрова северо-западных морей. М.: Наука, 1983.
9. Бусленко Н.П., Шрейдер Ю.А. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на цифровых вычислительных машинах. М.: Физматгиз, 1961.

## Spatial and Acoustical Models of the Ice Covered Sea Surface

I. A. Aleksandrov

Feasibility considerations are presented for spatial modeling of an ice cover as a series of zones characterized each by constant basic ice parameters (closeness, thickness, and size of ice blocks). An acoustical model of the sea surface covered with young and year-old ice in the form of broken ice, fragments of ice fields, and large ice fields, is presented. A computer technique that simulates an ice covered surface on the basis of a given spatial model is described. Examples of water-ice surface "realizations" are presented for sea surfaces partly covered with two types of ice, each having consistent basic parameters. A classification of ice-covered surfaces, according to their acoustical homogeneity, is suggested. The classification is based on the length of the interval over which the sound reflection coefficient is averaged.