

УДК 551.463.2

## АКУСТИЧЕСКАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ЗВУКОРАССЕИВАЮЩИХ СЛОЕВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АТЛАНТИКИ

© 2000 г. И. Б. Андреева, Н. Н. Галыбин, Л. Л. Тарасов, В. Я. Толкачев

*Акустический институт им. Н.Н. Андреева*

*117036 Москва, ул. Шверника, 4*

*E-mail: bvp@akin.ru*

Поступила в редакцию 27.12.98 г.

С целью количественного описания пространственной изменчивости в Мировом океане акустических неоднородностей, образуемых звукорассеивающими слоями (ЗРС), разработана компьютерная база данных. В нее вносятся результаты натурных измерений, проведенных за последние десятилетия. К настоящему времени база данных заполнена по Атлантическому океану и на примере его центральной части проверены два способа описания пространственного распределения значения  $M$ , суммарной силы слоя (интенсивности) ЗРС в диапазоне частот 3–20 кГц в светлое время суток. Первый способ – построение на карте океана изолиний величины  $M$ . Оно было сделано для шести частот указанного диапазона, и одна из этих карт (5 кГц) приведена в статье. Второй способ опирается на выделение гидрологически однородных районов и на статистическую обработку в пределах каждого из них всех значений  $M$ , занесенных в базу данных. После оценок средних по каждому району значений  $M$  и их дисперсий, оказалось возможным некоторые из этих районов объединить. В результате Центральная Атлантика была разделена на четыре акустически однородных (по рассматриваемому параметру) области, которые значимо различаются по статистическим оценкам силы слоя и их дисперсий. Приведены соответствующие карты и таблицы с численными характеристиками. Сравнение результатов, полученных этими двумя способами, показало их вполне удовлетворительное согласие.

Акустике звукорассеивающих слоев (ЗРС) океана за несколько последних десятилетий было посвящено большое число научных исследований. Эти слои имеют биологическую природу и интенсивно рассеивают акустические волны в диапазоне единиц–десятков килогерц. Пик научных публикаций по этим вопросам приходится на 60–70-е годы. В последнее время число статей по этой тематике заметно сократилось, но интерес к проблеме сохранился (например, работы [1, 2]). Почти все публикации по акустике ЗРС содержат лишь географически фрагментарную информацию, не дающую общей картины по океану. Даже в прекрасной работе [3], включающей в себя результаты измерений по всем океанам Земли (кроме Северного Ледовитого), приведены только выборочные данные вдоль нескольких разрезов.

Авторы статьи, многие годы изучавшие рассеяние звука на неоднородностях океана биологической природы, поставили перед собой задачу количественного описания, картирования по акватории Мирового океана основных акустических характеристик ЗРС – величин силы слоя в относительно широком диапазоне частот и глубин их залегания. Это потребовало привлечения максимально возможного объема экспериментальных данных по акустике ЗРС. Помимо уже опубликованных материалов, удалось использовать и

архивные записи из научных отчетов нескольких организаций России, проводивших натурные измерения характеристик ЗРС, в том числе и результаты исследований авторов статьи, составившие почти половину собранных материалов. Все это создало достаточно большой массив экспериментальных данных, которые, после некоторой дообработки могут рассматриваться совместно.

Была создана компьютерная база данных (БД), которая содержит информацию о характеристиках ЗРС, литературном источнике, географических координатах, годе, месяце и времени суток проведения опытов, глубине точки излучения-приема и некоторых технических подробностях измерений. Основными акустическими характеристиками ЗРС, вводимыми в базу данных, являются величины силы слоя  $M$  и глубины верхней и нижней границ каждого из выделенных слоев. Величина силы слоя равна интегралу по глубине от коэффициента объемного рассеяния в обратном (локационном) направлении. Интервал интегрирования равен интервалу глубин между верхней и нижней границами каждого слоя или простирается от поверхности на всю глубину, где наблюдаются ЗРС. В последнем случае величина называется суммарной для данной точки океана. Сила слоя  $M$  – величина безразмерная и, как правило, выражается в дБ по отношению к 1. Экспе-

риментальные величины, приводимые в большей части источников, являются результатом усреднения по нескольким последовательным актам регистрации, сделанным при неизменных условиях. По нашим оценкам их разброс характеризуется среднеквадратичным отклонением около 1.0–1.5 дБ.

Основная часть результатов в БД приведена на шести частотах: 3, 5, 7, 10, 15 и 20 кГц. На более низких частотах уровень рассеяния в ЗРС низок (особенно в светлые часы суток) и отклик слоев оказывается не выше уровня шумов. На более высоких частотах потери на поглощение звука в морской воде при распространении зондирующего и рассеянного сигналов становятся настолько большими, что возможные ошибки определения величины коэффициента поглощения могут внести заметную ошибку и в величину силы слоя, рассчитанную по данным эксперимента.

В настоящей статье рассмотрена область центральной части Атлантики, для которой в БД уже собрано достаточно большое число значений одной из основных акустических характеристик – суммарной силы слоя ЗРС. Все рассматриваемые в статье данные относятся к светлому времени суток, когда ЗРС находятся в глубинах океана.

В зоне центральной Атлантики было выделено семь районов, примерно однородных по своим гидрологическим свойствам (рис. 1); ниже приводится их краткое описание.

**Район 1** в основном соответствует Саргассову морю, для него характерен мощный по глубине и однородный по температуре приповерхностный теплый слой воды и низкая биологическая продуктивности. **Районы 2 и 7** гидрологически сходны, являются переходными к умеренным широтам и относительно стабильными как по динамике течений, так и по структуре водных масс. Для них характерны хорошо развитый приповерхностный теплый слой, глубокое положение слоя скачка и низкая биопродуктивность верхних слоев воды. **Районы 3 и 6** расположены в восточных частях соответственно северных и южных тропиков и также сходны по своим свойствам. Гидродинамические условия в них сложны, здесь наблюдаются многочисленные локальные фронтальные зоны, неустойчивые во времени и пространстве. **Район 4** вытянут вдоль экватора, в нем взаимодействуют Северное и Южное пассатные течения, а также Экваториальное течение и противотечение. Это приводит к образованию температурно однородного приповерхностного слоя и заглужению слоя скачка. Вынос Экваториальным течением большого числа органических веществ, поднимающихся из глубин океана у берегов Африки, делает этот район биопродуктивным. **Район 5**, зона подъема промежуточных вод у африканского побережья, характеризуется вы-

сокой биопродуктивностью. Границы этих районов, приведенные на рис. 1, не являются строго фиксированными и под влиянием многих природных факторов могут смещаться на несколько градусов. На этом же рисунке звездочками показаны места проведения акустических измерений, результаты которых использованы в статье.

Усредненное по акватории распределение значений суммарной силы слоя  $M$  в рассматриваемой области океана может быть представлено по крайней мере двумя способами: во-первых, в виде совокупности изолиний величины  $M$  на акватории; во-вторых, в виде доверительных интервалов для истинных средних и дисперсий этой величины для разных частей этой акватории. Доверительные интервалы рассчитываются, исходя из предположения, что в пределах каждого гидрологически однородного района характеристики ЗРС также статистически однородны. Оба способа рассмотрения должны проводиться отдельно на каждой из частот. Следует отметить, что несмотря на большое число акустических измерений, выполненных в океане, из-за неравномерности их распределения по акватории не следует считать приводимые ниже оценки интенсивности ЗРС вполне надежными. Но этот путь сегодня, видимо, один из немногих, который может дать хоть и приближенные, но все же статистически обоснованные количественные оценки распределения акустических свойств ЗРС по акватории океана.

На рис. 2 приведены изолинии суммарной силы слоя, измерявшейся на частотах 5, 10 и 20 кГц, и нанесенные с шагом 10 дБ. Они строились с использованием триангуляционного метода при линейной интерполяции между точками. Штриховыми линиями нанесены границы гидрологически однородных районов, показанных на рис. 1. Изолинии на каждой из частот имеют собственную конфигурацию, но общая картина распределения интенсивности ЗРС остается схожей.

Отметим некоторые особенности распределения величины силы слоя на карте рис. 2. Белое пятно в юго-восточной части карты соответствует району, для которого сведения о рассеянии в нашей базе данных практически отсутствуют. На карте выделяются относительно богатая рассеивающими слоями (особенно на низких частотах) приэкваториальная зона и бедные зоны, соответствующие Саргассову морю в северном полушарии и зоне циклонического круговорота в южном. Общее расположение изолиний на карте примерно соответствует границам гидрологически однородных районов, и это подтверждает гипотезу о тесной связи гидрологических, акустических и биологических характеристик океана. Локальные отличия на картах для разных частот, в частности, положение “пятен” при  $M$  больше  $-40$

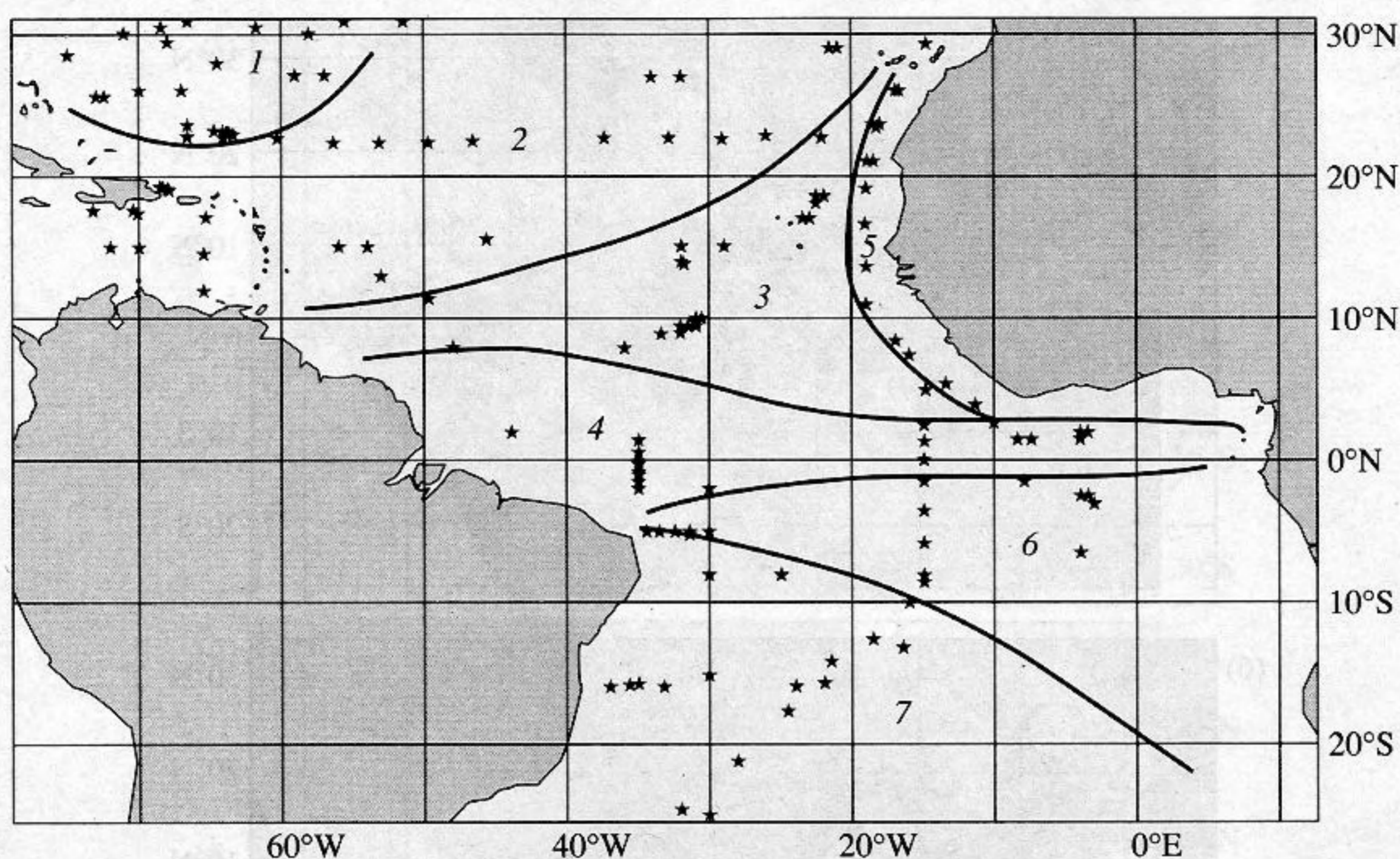


Рис. 1. Карта гидрологического деления центральной части Атлантического океана и точки измерений акустических характеристик ЗРС.

и меньше  $-60$  дБ, видимо, связаны с различием в составе фауны ЗРС [4].

Изображенная на рис. 2 пространственная картина очень наглядна, но не дает вероятностных оценок достоверности измеренных величин силы слоя. Это оценки можно получить при втором способе решения поставленной задачи. Предположим, что в пределах каждого из выделенных гидрологически однородных районов значения суммарной силы слоя, занесенные в БД (выборочные значения), принадлежат одной генеральной совокупности. При совместной обработке результатов измерений будем считать, что все они выполнены с одинаковой точностью и имеют одинаковый статистический вес. Кроме того, было проверена гипотеза о нормальном распределении значений суммарной силы слоя  $M$  во всех рассматриваемых районах. Проверка проводилась на каждой из частот с помощью критерия  $W$ , оптимального при малых выборках [5]. Оказалось, что в большинстве случаев нет оснований отвергать эту гипотезу.

На первом этапе совместной обработки данных по каждому району и для каждой частоты вычислялись выборочные средние арифметические значения силы слоя (в дБ) и дисперсии отклонений отдельных измерений от этого среднего. Методом, стандартным при статистической обработке экспериментальных данных, исключались аномальные значения (выбросы)  $M$  в рассматриваемой выборке. Затем для любой пары районов

проверялась гипотеза о равенстве выборочных средних значений и дисперсий силы слоя. Если они были равны на 5-процентном уровне значимости, то делался вывод о принадлежности этих выборок к одной генеральной совокупности, данные по этим районам объединялись, и обработка повторялась. На частоте 20 кГц в акваториях Саргассова моря (район 1) и южного циклонического круговорота (район 7) равенство соблюдалось только для выборочных средних, а соответствующие дисперсии значительно различались. Это не позволило объединить районы 1 и 7. Области с равными средними и дисперсиями величин  $M$  на данной частоте далее мы называем акустически однородными областями.

На каждой частоте было выделено четыре акустически однородные области. Границы этих областей (номера объединяемых гидрологически однородных районов) могли быть разными на разных частотах. В качестве примера на картах рис. 3 эти области нанесены для частот 5, 10 и 20 кГц. В таблице для них же приведены количественные оценки параметров силы слоя. В верхней части таблицы даны оценки средних значений  $\hat{M}$ , величин дисперсий  $\hat{\sigma}^2$  и коэффициента вариации  $\hat{v}$ , полученных по каждой выборке объема  $n$ . В нижней части таблицы даны приближенные 95-процентные доверительные интервалы истинных средних значений силы слоя  $\bar{M}$ , дисперсий  $\sigma^2$  и

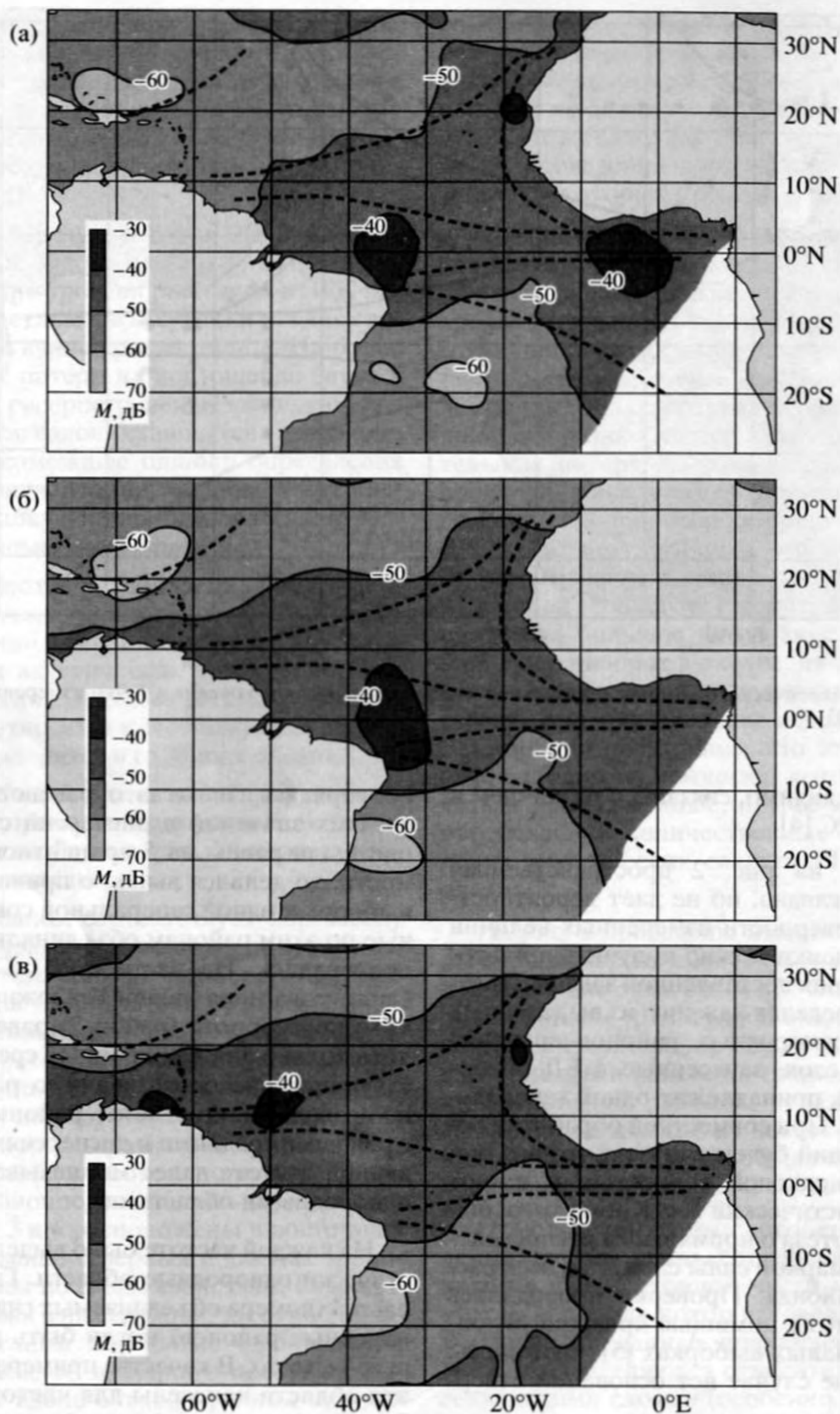
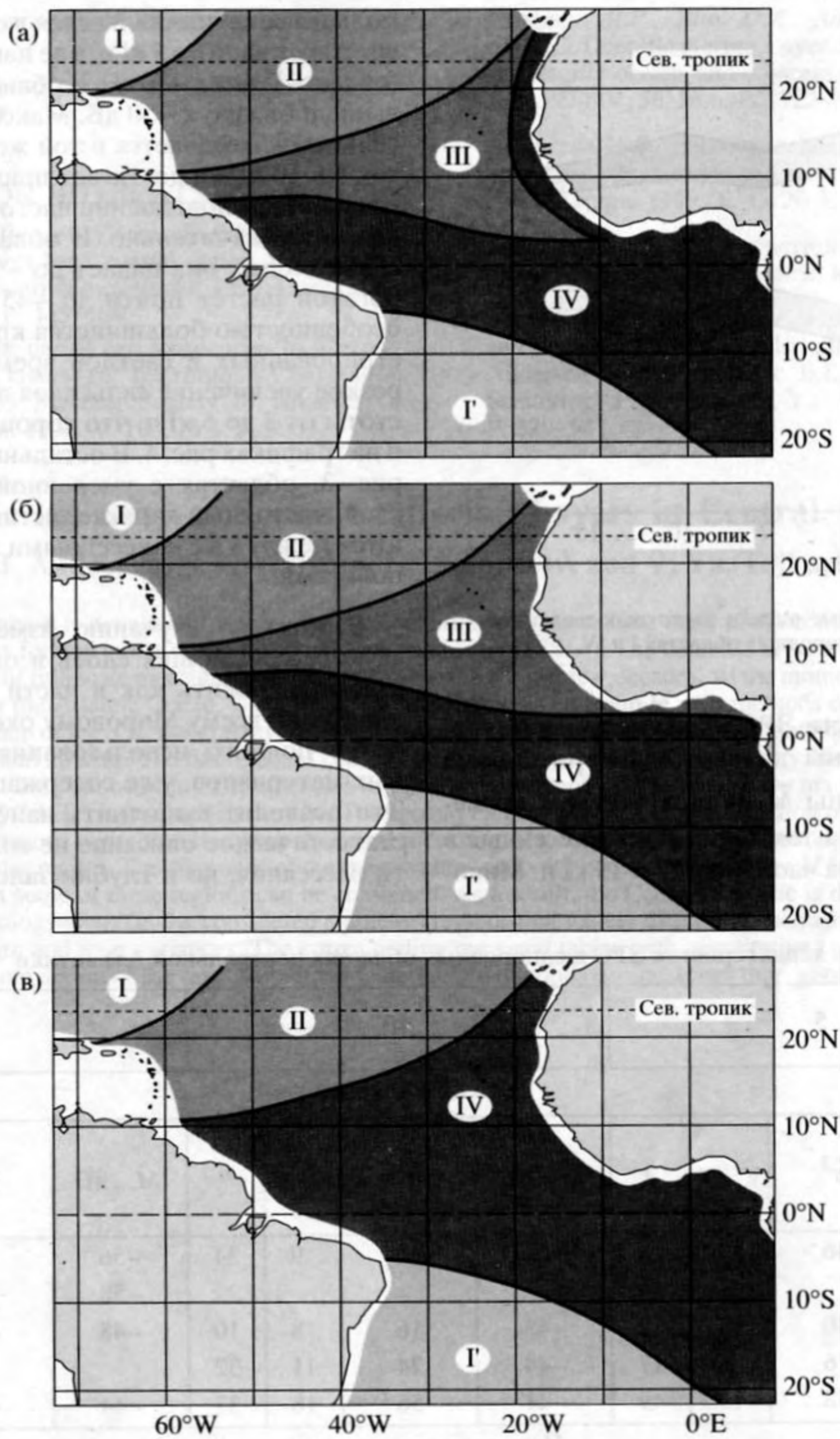


Рис. 2. Карты изолиний величины суммарной силы слоя на частотах: а – 5 кГц, б – 10 кГц, в – 20 кГц.

соответствующие интервалы коэффициента вариации  $\bar{v}$ .

Самые низкие значения силы слоя на всех частотах наблюдаются в областях I и Г (Саргассово море и южный циклонический круговорот, соот-

ветственно). Наиболее интенсивное рассеяние отмечено в зоне прибрежного апвеллинга и в экваториальной области (области III и IV). В области II (акватория северных умеренных широт) уровни рассеяния во всем рассматриваемом частотном диапазоне являются промежуточными.



**Рис. 3.** Области Центральной Атлантики, статистически однородные по суммарной величине силы слоя: а – 5 кГц; б – 10 кГц; в – 20 кГц. Насыщенность окраски областей качественно соответствует интенсивности ЗРС. Численные значения приведены в таблице.

Подобное пространственное распределение интенсивности ЗРС качественно соответствует картам изолиний рис. 2, гидрологическим особенностям акваторий, описанным выше, и не противоречит карте пелагического районирования Атлантического океана [6].

На рис. 4 в виде заштрихованных полос, соответствующих 95-процентным доверительным интервалам, изображены частотные характеристики величин силы слоя  $\bar{M}$  для двух акустически однородных областей (I и IV), резко различающихся по

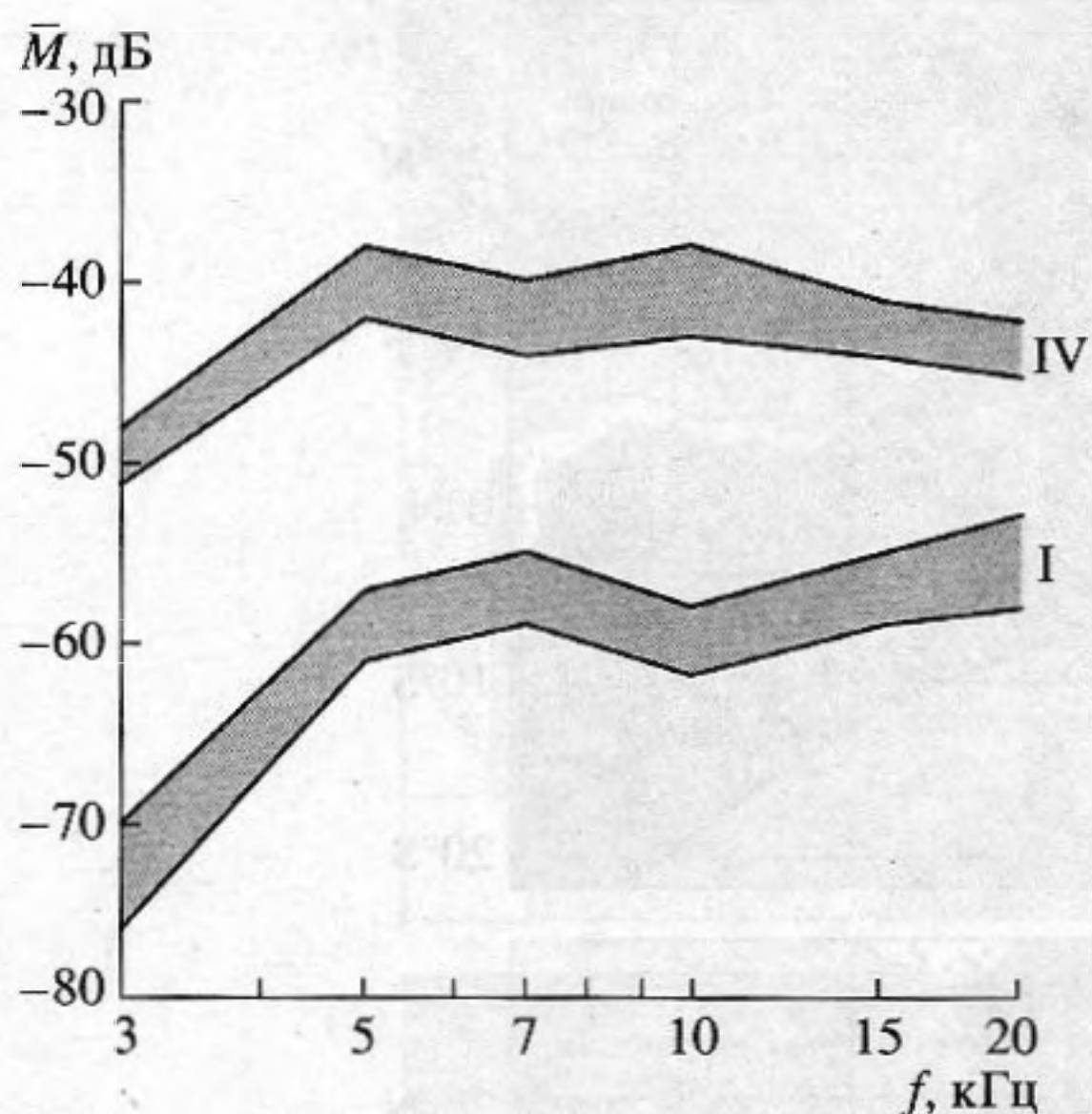


Рис. 4. Интервальные оценки частотных зависимостей силы слоя в однородных областях I и IV.

общей интенсивности ЗРС. При построении графиков использованы данные о доверительных интервалах величины  $\bar{M}$  на всех частотах проведенной обработки, в том числе и не занесенные в таблицу значения на частотах 3, 7 и 15 кГц. Мини-

мальная величина силы слоя в обоих случаях соответствует частоте 3 кГц, а ее наименьшее значение (область I) ниже  $-70$  дБ. В области IV это значение выше и близко к  $-50$  дБ. Максимальная величина силы слоя отмечается в той же области на частотах 5 и 10 кГц и достигает примерно  $-40$  дБ. При дальнейшем повышении частоты сила слоя изменяется незначительно. В области I, бедной рассеивателями, она падает до  $-55$  дБ, а в области богатой растет почти до  $-45$  дБ. Характерной особенностью большинства кривых  $M(f)$ , зарегистрированных в светлое время суток, является резкое увеличение силы слоя при повышении частоты от 3 до 5 кГц, что хорошо прослеживается и на графиках рис. 4. В остальных областях карты рис. 3, областях с умеренной величиной силы слоя, частотные характеристики  $M(f)$  располагаются между уже нанесенными заштрихованными полосами.

Работы по изучению изменчивости свойств звукорассеивающих слоев в океане предполагается продолжить как в части расширения базы данных по всему Мировому океану, так и в части более полного использования экспериментальных материалов, уже содержащихся в этой базе. Это позволит выполнить наиболее достоверное статистическое описание не только интенсивности рассеяния, но и глубин залегания ЗРС, их су-

#### Оценки акустических характеристик ЗРС в однородных областях центральной Атлантики

$f$ , кГц	5				10				20			
Точечные оценки												
Область	$\hat{M}$ , дБ	$\hat{\sigma}^2$	$\hat{V}$ , %	$n$	$\hat{M}$ , дБ	$\hat{\sigma}^2$	$\hat{V}$ , %	$n$	$\hat{M}$ , дБ	$\hat{\sigma}^2$	$\hat{V}$ , %	$n$
I	-60	46	12	38	-60	30	9	34	-56	23	9	15
Г									-58	77	15	16
II	-52	40	12	12	-48	16	8	10	-48	62	17	13
III	-46	16	9	17	-44	24	11	32				
IV	-40	58	19	49	-41	56	18	37	-44	48	16	63
Интервальные оценки												
Область	$\bar{M}$ , дБ	$\bar{\sigma}^2$	$\bar{V}$ , %	$\bar{M}$ , дБ	$\bar{\sigma}^2$	$\bar{V}$ , %	$\bar{M}$ , дБ	$\bar{\sigma}^2$	$\bar{V}$ , %	$\bar{M}$ , дБ	$\bar{\sigma}^2$	$\bar{V}$ , %
I	-61...-57	28...77	9...15	-62...-58	20...52	7...13	-58...-53	12...57	6...14			
Г							-63...-54	41...201	10...26			
II	-56...-48	20...114	8...22	-51...-45	9...81	6...18	-50...-45	38...162	11...28			
III	-48...-44	9...37	6...14	-46...-43	15...42	8...15						
IV	-42...-38	40...90	15...25	-44...-38	28...98	12...26	-45...-42	36...74	14...21			

точных миграций в разных областях Мирового океана.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 98-05-64849.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wiebe P.H.* High-frequency acoustic volume backscattering in the Georges bank coastal region and its interpretation using scattering models // *IEEE J. Ocean Eng.* 1997. V. 22. № 3. P. 445–464.
2. *McKelvey D.R.* The use of two frequencies to interpret acoustic scattering layers (16<sup>th</sup> International Congress on Acoustics and 135 Meeting Society of America) // *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 103. № 5. P. 3069.
3. *Chapman R.P., Bluy O.Z., Adlington R.H., Robinson A.E.* Deep Scattering Layer Spectra in the Atlantic and Pacific oceans and adjacent seas // *J. Acoust. Soc. Am.* 1974. V. 56. № 6. P. 1722–1735.
4. *Андреева И.Б.* Звукорассеивающие слои как акустические неоднородности толщи вод океана // *Акуст. журн.* 1999. Т. 45. № 3.
5. *Хан Г., Шапиро С.* Статистические модели в инженерных задачах. Пер. с англ. М.: Мир, 1969. 395 с.
6. *Backus R.H., Craddock J.E.* Pelagic Faunal Provinces and Sound-scattering Levels in the Atlantic ocean // In: *Andersen N.R., Zahuranec B.I., Ed., Oceanic Sound Scattering Prediction.* N.-Y.: Plenum Press. 1977. P. 529–547.

## Acoustic Intensity of Sound Scattering Layers in Central Atlantic

I. B. Andreeva, N. N. Galybin, L. L. Tarasov, and V. Ya. Tolkachev

A computer database is developed for the purposes of quantitatively describing the spatial variability of acoustic inhomogeneities formed in the ocean by sound scattering layers (SSLs). The database is now being completed with the results of full-scale measurements carried out during the last few decades. At the moment, the database is completed for the Atlantic Ocean. Using the Central Atlantic as an example, two methods of describing the spatial distribution of the SSL integral layer strength (intensity)  $M$  are tested for the daylight hours and frequencies between 3 and 20 kHz. The first method consists of plotting the isolines of the quantity  $M$  on the map of the ocean. Such plots are obtained for six frequencies of the above frequency range; one of the maps (corresponding to the frequency 5 kHz) is presented in the paper. The second method is based on the selection of hydrologically homogeneous regions with the subsequent statistical processing of all layer strengths  $M$  existing in the database for every particular region. The estimates of the mean values and variances of the quantity  $M$  for individual regions show that some of these regions can be combined. As a result, the Central Atlantic is divided into four acoustically homogeneous (in the considered parameter) regions that widely differ in the statistical estimates of the layer strength and their variances. The corresponding maps and tables with quantitative characteristics are presented. The comparison of the results obtained with the two methods demonstrates their good agreement.