АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 39 1993 Вып. 1

УДК 463.21; 577.475; 574.6

© 1993 г. Б.М. Сандлер, Д.А. Селивановский, П.А. Стунжас

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СГУЩЕНИЙ ФИТОПЛАНКТОНА

Приведены результаты измерения скорости звука в средах с монокультурами различных видов клеток морского фитопланктона в сравнении с величинами скорости звука в морской воде с теми же гидрохимическими параметрами. В экспериментах использовался фазовый метод, основанный на измерении интервала частоты при ее перестройке для одного и того же фазового соотношения сигналов на излучателе и приемнике. Исследование проводилось на живом фитопланктоне при объемной концентрации клеток $\leqslant 10^{-4}$ в полосе частот 75 кГц – 11 МГц. Выявлен ранее не упоминаемый эффект увеличения скорости звука в средах с фитопланктоном, достигающий в среднем величины $\Delta C_{\text{среды}}/C_{\text{воды}} < +10^{-3}$ (в частотных интервалах 300–700 кГц – до $+10^{-2}$) и на порядок перекрывающий противоположный эффект: уменьшение скорости звука в средах с фитопланктоном из-за наличия в клетках газовых полостей. Обнаруженный эффект пропорционален среднему расстоянию между клетками в среде. Полученные результаты свидетельствуют о возможности существования сгущений фитопланктона в виде горизонтальных слоев, границы которых могут иметь силы цели до –50 дБ по крайней мере для частот локации > 75 кГц.

С 50-х годов, т.е. с начала гидроакустических исследований в океане неоднократно поднимался вопрос об акустической "значимости" фитопланктона. Так, например, Weston (1958) [1] и Cushing (1956) [2] считали присутствие в среде сгущений фитопланктона одной из возможных причин наличия на эхограммах некоторых звукорассеивающих слоев. Однако известные в те времена свойства фитопланктона оказались недостаточными для объяснения наблюдаемой аномалии в рассеянии звука. Для определения степени влияния фитопланктона на акустические свойства среды измерялись величины скорости звука в воде, содержащей фитопланктон и некоторых других мелких морских организмов (Watson, Meister, 1963) [3]. При этом обнаруженные изменения в значениях скорости звука в суспензиях фитопланктона на частотах 6–10 МГц были объяснены существованием "размерно-резонансных эффектов". Следует обратить внимание на то, что измерения проводились на массе фитопланктона, которая вначале отфильтровывалась, а потом вновь растворялась в дистиллированной воде. При этом не указывалось был ли жив биологический материал в растворе. К тому же его концентрации в этих опытах были на три-четыре порядка выше максимальных, отмеченных в природе. В других исследованиях было обнаружено увеличение затухания низкочастотного ($\leqslant$ 10 кГц) звука в средах с фитопланктоном. Измерения были проведены с помощью реверберационного бака [4] в морских и в лабораторных условиях. В целом все эти исследования не позволили включить фитопланктон в круг акустически значимых объектов морской гидроакустики.

Вновь фитопланктон как акустический фактор вызвал по крайней мере наш интерес после обнаружения в его сгущениях, конкретно в клетках фитопланктона газовых полостей (изложение этих исследований см. в [5–7], а также [8–10]). Исследования проводились in vivo на монокультурах клеток, а также in situ в океанической экспедиции 29-го рейса НИС "Профессор Водяницкий" (1989).

Дисперсионная характеристика скорости звука в воде с живым фитопланктоном при наличии газовых полостей в клетках легко прогнозируется [11]: скорость звука уменьшается на частотах ниже резонансных этих полостей в клетках ($f \simeq$ 6–8 МГц). Этот эффект был подтвержден измерениями отношения скоростей звука на двух часто-

тах: $f = 7{,}5$ МГц – резонансная частота газовых полостей и $f = 0{,}75$ МГц. Синхронные измерения циклическими датчиками скорости звука как в лабораторных условиях на монокультурах клеток, так и in situ в приповерхностных слоях океанских вод показали увеличение отношения $C(f = 7{,}5\ \text{МГц})/C(f = 0{,}75\ \text{МГц}) > 1 + (10^{-5} - 10^{-4})$, что удовлетворительно совпадает с рассчитанной величиной этого эффекта по результатам измерений размеров газовых полостей в клетках другими различными способами: по уровням объемного рассеяния на частоте $f = 6$ МГц; по изменению сжимаемости сред с фитопланктоном по сравнению с чистой морской водой и по увеличению объема сред при увеличении численности фитопланктона при делении клеток [6–10].

Однако в ходе эксперимента по измерению отношения скоростей звука на частотах $f = 7{,}5$ МГц и $f = 0{,}75$ МГц в средах с фитопланктоном выявился новый весьма значительный эффект: $C_{\text{среды}}(f = 7{,}5\ \text{МГц})/C_{\text{воды}} \simeq C_{\text{среды}}(f = 0{,}75\ \text{МГц})/C_{\text{воды}} \geqslant 1 + (10^{-4} - 10^{-3})$, т.е. увеличение скорости звука в среднем на порядок больше, чем ее дисперсионное изменение из-за газовых полостей.

Увеличение скорости звука в средах с фитопланктоном может означать, в частности, уменьшение эффективной сжимаемости среды, которая заметна на частотах $f = 7{,}5$ и 0,75 МГц, не проявляется вблизи нуля частот: статическая сжимаемость чистой морской воды с теми же гидрохимическими параметрами меньше сжимаемости сред с фитопланктоном [8]. Это может означать, что частотная зависимость обнаруженного эффекта неравномерна, что отнюдь не безразлично для морской гидроакустики.

В данном сообщении приводятся результаты измерения скорости звука в средах с фитопланктоном монокультур водорослей in vivo, которые сравниваются со скоростью звука в воде без фитопланктона в полосе частот 75 КГц – 11 МГц. Скорость звука определялась фазовым методом. Для этого в торцах базы известной длины располагались навстречу друг другу поршневые излучатель звука и приемник, выполненные из одинаковых конструктивных элементов. При перестройке частоты звука, подаваемого на излучатель, фиксировались значения частот, при которых сигналы на излучателе и приемнике имели одинаковые фазы. При этом легко показать, что перестройка частоты Δf, при которой на базе число размещающихся плоских волн ультразвука меняется на единицу, связано со скоростью звука в среде простым соотношением: $\Delta f = C/L$, где L – длина базы. Поскольку целью измерений являлось определение относительных значений скорости звука в средах и чистой морской воде, точные данные о длине базы распространения звука играли второстепенную роль, они не участвовали в расчете эффекта, но всегда учитывались косвенно в грубой оценке величины каждого шага перестройки по частоте. Окончательный результат измерений имел вид: $C_{\text{среды}}/C_{\text{воды}} = (\langle f_{\text{среды}} \rangle / \langle \Delta f_{\text{воды}} \rangle)$ для диапазона частот, в котором производится усреднение данных.

Предъявляемые для рассмотрения данные измерений в диапазоне 75 КГц – 11 МГц были получены отдельно в различные сезоны на двух установках с базами 354 мм (в полосе частот 75–2500 КГц, шаг $\Delta f \simeq 4{,}2$ КГц) и 28 мм (в полосе частот 1–11 МГц, шаг $\Delta f \simeq 53$ КГц). Для измерений в диапазоне частот 75–2500 КГц база выполнена из тонкостенной трубы из стекла с диаметром 60 мм и толщиной стенок 1,2 мм. Для измерений в диапазоне частот 1–11 МГц использовалась база из нержавеющей стали в виде цилиндрической трубки с прорезями вдоль образующих и с закрепленными на торцах приемником и излучателем звука.

При проведении эксперимента как в средах, так и в чистой воде поддерживалась одинаковая постоянная температура 21,1° с точностью не хуже 0,1°, что осуществлялось с помощью ультратермостата, вода из которого во время измерений омывала стеклянную трубу (опыты 75–2500 КГц) или кювету со средой, в которую помещалась измерительная база для частот 1–11 МГц.

Возможное появление газовых пузырьков на внутренних стенках установок, связанное с обратной диффузией газов из сред с фитопланктоном из-за парциального пересыщения среды кислородом, нейтрализовалось добавлением в среду (как впрочем и в чистую воду) сульфита натрия Na_2SO_3 в количестве 0,04 г/л. При этом на время опытов парциальное содержание кислорода снижалось в средах до уровня

Относительное изменение скорости звука в средах с фитопланктоном $\Delta C_{среды}/C_{воды}$ и среднеквадратичные отклонения по сумме измерений; частотные интервалы f (кГц); размеры (мкм); объемы (мкм); объемные концентрации клеток в средах

N	$\Delta C_{среды}/C_{воды} \times 10^3$										
	f										
	75 100	100 150	225 338	338 500	750 1150	1150 1700	1700 2550	2550 3800	3800 5800	5800 8700	8700 13000
1	−10,0	−12,0	−11,1	+17,2	+6,3	+5,0	+5,2	+4,1	+4,6	+0,5	+7,3
	±11,0	±9,1	±8,4	±8,6	±2,5	±2,2	±2,4	±3,6	±2,0	±1,5	±1,6
2	←		1991 г.		→	+35,2	−1,2	+1,5	+0,6	+0,7	+1,3
	−20,0	−27,0	−59,0	+2,6	−8,5	←			1990 г.		→
3						+6,6	+6,0	+0,9	+2,3	+4,3	+0,2
4						+4,0	+1,6	+1,0	+0,2	+2,1	+11,0
	−8,3	−9,6	−1,3	+5,0	−0,4	+3,8					
5							−11,0	0	+2,1	+3,8	+2,4
6							−8,0	+6,9	−24	+0,7	+1,7
7						+1,0	+2,6	+4,8	+6,9	+4,4	+0,4
8	+3,3	+1,3	+6,0	+13,0	+0,6	+4,5	+7,2				
	+20,0	+20,0	+7,0	+2,0	+0,5	+1,0	+2,0				
9	+3,0	−1,0	+7,0	+5,0	+0,6	+0,2	+2,0				
10						+14,5	+2,6	+5,9	+9,7	+11,7	+4,9
						±1,5	±1,8	±2,7	±3,4	±3,1	±4,0
	−1,0	+1,4	−1,3	+20,0	+0,8	+3,3	+2,2				
	±0,5	±0,3	±0,6	±1,2	±1,3	±1,8	±1,8				
11							+2,9	+1,0	+1,3	+1,1	+1,1
	+18,3		+1,4	+6,0	0	0	+0,3				
12							+3,6	+3,8	+2,6	+2,6	+2,5
13							+3,5	+2,0	+1,1	+3,4	+1,3
14							+4,0	+1,2	+1,7	+0,7	−6,5
15							+4,3	+2,0	+3,9	+6,2	+3,3
16							+1,1	+0,6	+0,3	+1,5	+2,2

17	+10,1	+0,1	−4,5	+1,9	+18	+5,0	−0,8				
18							+5,0	+0,6	+0,6	+0,9	+1,1
	+15,3	0	+2,8	+11,6	−1,0	−8,0	+6,1				
							+1,0	+3,3	+4,9	+7,7	+7,0
				средние			+4,0	+2,0	+2,8	+4,3	+4,0

1 – Prorocentrum micans 42 × 30 × 20	$V = 1{,}4 \cdot 10^4$	$n = (1–2) \cdot 10^{-4}$
2 – Peridinium triquetrum 23 × 15 × 15	$V = 8 \cdot 10^3$	$n = (2–3) \cdot 10^{-4}$
3 – Peridinium trochoideum 23 × 15 × 15	$V = 8 \cdot 10^4$	$n = (2–3) \cdot 10^{-4}$
4 – Olisthodiscus luteus 17 × 12 × 6	$V = 6 \cdot 10^2$	$n = 2{,}4 \cdot 10^{-4}$
5 – Gymnodinium kovalevskii 14 × 9 × 9	$V = 5{,}6 \cdot 10^2$	$n = 10^{-4}$
6 – Gymnodinium wulffii 14,5	$V = 2 \cdot 10^3$	$n = 4 \cdot 10^{-4}$
7 – Platymonas viridis 13 × 8 × 5	$V = 2{,}5 \cdot 10^2$	$n = (6–8) \cdot 10^{-4}$, $n = 2 \cdot 10^{-4}$
8 – Platymonas viridis 13 × 8 × 5	$V = 2{,}5 \cdot 10^2$	$n = 3 \cdot 10^{-5}$
9 – „		$n = 3{,}5 \cdot 10^{-6}$
10 – Dunaliella salina 11 × 7 × 3	$V = 1{,}5 \cdot 10^2$	$n = (1{,}2–2{,}4) \cdot 10^{-4}$
11 – Phaeodactilum tricornutum	$V = 20$	$n = 1{,}2 \cdot 10^{-5}$, $n = 5 \cdot 10^{-5}$
12 – Exuviaella cordata 18 × 12 × 12	$V = 1{,}3 \cdot 10^3$	$n = 1{,}7 \cdot 10^{-4}$
13 – Gymnodinium lanskaya 12 × 8 × 8	$V = 4 \cdot 10^2$	$n = 2 \cdot 10^{-4}$
14 – Gymnodinium fiisum ϕ 29	$V = 1{,}4 \cdot 10^4$	$n = 1{,}4 \cdot 10^{-4}$
15 – Coccolithus huxleyi 13 × 10 × 11	$V = 8{,}3 \cdot 10^2$	$n = 2{,}5 \cdot 10^{-5}$
16 – Amphidinium klepsi 12 × 9 × 4	$V = 2{,}2 \cdot 10^2$	$n = 2{,}8 \cdot 10^{-5}$
17 – Porphiridium cristum + cruentum (красные) ϕ 7	$V = 1{,}7 \cdot 10^2$	$n = 3{,}5 \cdot 10^{-4}$
18 – Сине-зеленые водоросли ϕ 0,7	$V = 0{,}2$	$n = 4 \cdot 10^{-5}$

6 мл/л и газовые пузырьки на стенках не образовывались. Столь малые добавки сульфита натрия не сказывались (как это было выяснено специальными наблюдениями) на жизнедеятельности планктона. Чувствительность метода уточнялась в ходе дополнительных сравнительных измерений с чистой морской водой, имеющей соленость 16 (Черное море) и 35‰ (океанская вода).

В опытах были измерены свойства скорости звука в средах различных видов водорослей, относящихся к динафлагеллятам, золотистым, красным и сине-зеленым. Таким образом, измерены свойства сред с фитопланктоном всех тех видов, которые присутствуют в воде в опытах по выявлению газовых полостей с добавлением вновь красных и сине-зеленых водорослей. Объемная концентрация достигала величины $n \simeq (0{,}1-3) \cdot 10^{-4}$ мл/мл. Для водорослей Platimonas viridis специально были проведены многочисленные повторные измерения и, кроме того, измерения с различными объемными концентрациями клеток в растворах.

Кроме этого, в диапазоне частот 1–11,5 МГц все измерения проводились на водорослях повторно после компрессии растворов до добавочного давления +5 атм.

Обработка результатов опытов состояла в определении средних величин шагов по частоте, усредненных в третьоктавных частотных диапазонах, и в расчете отношений $< \Delta f_{\text{среды}}/\Delta f_{\text{воды}}$ для каждого третьоктавного диапазона частот.

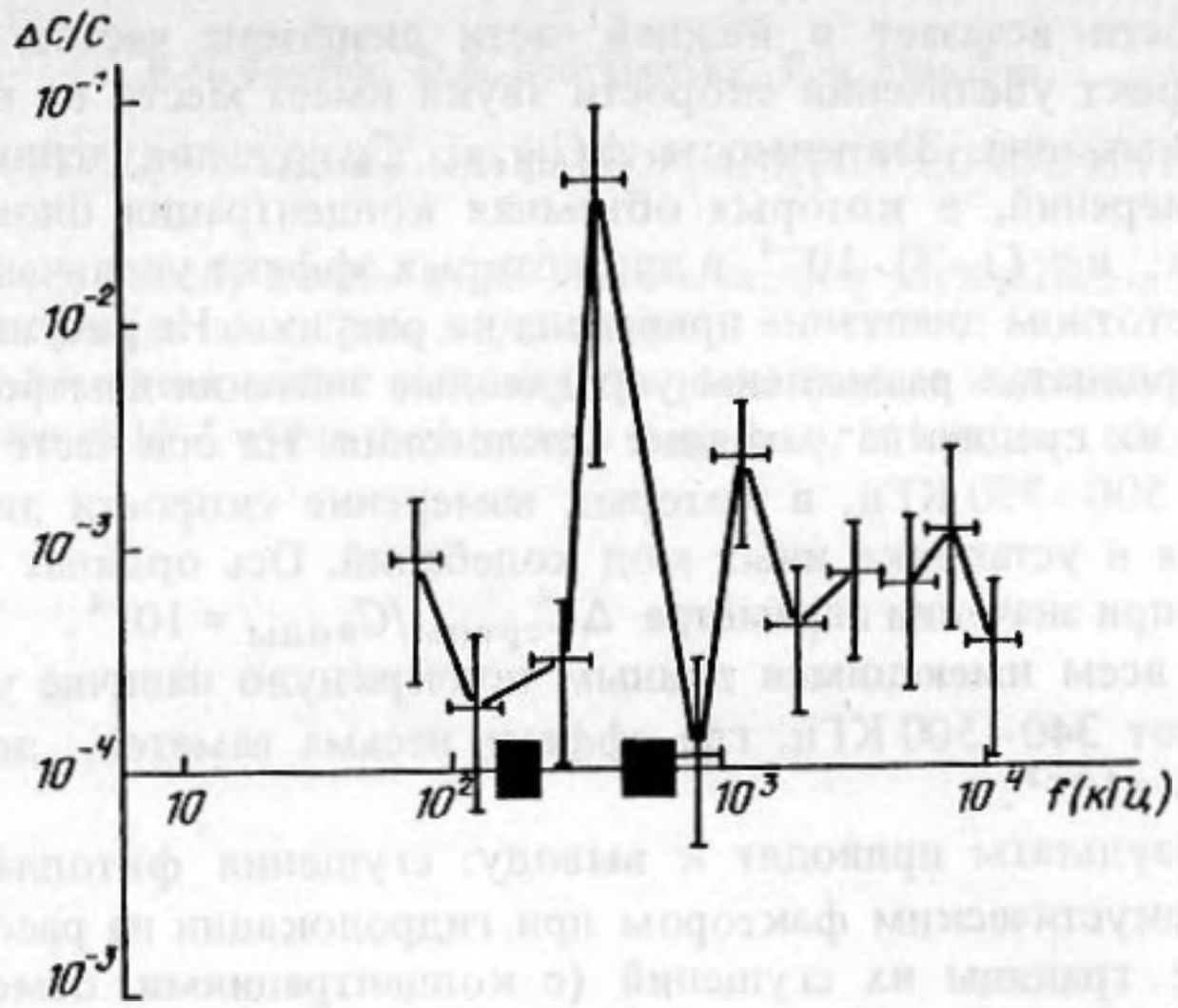
В таблице приведены средние величины отличий отношений $\langle \Delta f_{\text{среды}} \rangle / \langle \Delta f_{\text{воды}} \rangle$ от единицы и в характерных случаях среднеквадратичные отклонения этой величины.

По каждому разделу таблицы, т.е. для каждого вида клеток и каждого диапазона частот звука суммированы данные не менее двух циклов измерений. Как указывалось, измерения проводились в два этапа в разные сезоны (весной в 1990 г. и летом в 1991 г.). Известно [8], что существует значительная сезонная изменчивость свойств фитопланктона: изменяются размеры клеток, темпы деления и т.п. Тем не менее, как это следует из представленных в таблице данных, результаты измерений удовлетворительно подтверждаются в области пересечения частотного параметра измерений (диапазон 1,1–1,7 МГц; см., например, п. 4 – Olisthodiscus luteus, или п. 10 – Dunaliella salina, или п. 7 – Platymonas viridis: в двух последних случаях следует учитывать разницу концентраций клеток при измерениях). Для того чтобы подчеркнуть, что результаты получены в разные сезоны, все данные в таблице для каждого вида клеток размещены в два ряда таким образом, что в нижнем ряду приводятся результаты сезона 1991 г., а в верхнем – измерения 1990 г. Этот способ представления отмечается дополнительно в п. 2 – Peridinium triquetrum.

Из приведенных в таблице данных следует, что рассматриваемый эффект: увеличение скорости звука в средах с клетками фитопланктона свойствен всем обследованным видам клеток. Однако для некоторых видов клеток этот эффект исчезает на частотах ниже 340 КГц (таковы среды с динафлагеллятами Prorocentrum mucans) (концентрации клеток в опытах $N \simeq 1{,}5 \cdot 10^4$ кл/мл), Peridinium triquetrum ($N \simeq 2 \cdot 10^4$ кл/мл) и золотистых Olysthodiscus luteus ($N \simeq 1{,}5 \cdot 10^5$ кл/мл), а также, возможно, на частотах ниже 2,5–4 МГц для Gymnodinium kowalevskii ($N \simeq 1{,}7 \cdot 10^5$ кл/мл) и Gymnodinium wulffii ($N \simeq 2 \cdot 10^5$ кл/мл).

Эффекты увеличения скорости звука в средах с фитопланктоном имеют для всех видов и для выбранных объемных концентраций клеток величины $\Delta C/C \simeq 10^{-3}$, т.е. на один-два порядка превышают противоположный эффект: уменьшение скорости звука из-за наличия в клетках газовых полостей. Поэтому включение в опыты повторных измерений на средах после их компрессии (при компрессии, как указывалось в [6, 9], у некоторых видов клеток: Platymonas viridis, Dunaliella salina, Phaeodactilum tricornutum, газовые полости при компрессии исчезают на некоторое время, а у других – всех прочих, упомянутых в таблице, ведут себя упруго, восстанавливая свои размеры после снятия избыточного давления) не изменило величины эффекта увеличения скорости в пределах точности измерений.

Анализ результатов опытов показывает, что с увеличением численности клеток эффект усиливается. При этом для специально поставленных опытов с культурой



Относительное увеличение скорости звука в средах с фитопланктоном при объемных концентрациях клеток 10^{-4}, полученное усреднением данных по 10 видам клеток в монокультурах и по результатам 20 циклов измерений. В отмеченных на оси частот заштрихованными квадратами интервалах частот (150–225 и 500–750 КГц) измерения $\Delta C/C$ отсутствуют

Platymonas viridis, численность клеток в которых уменьшалась в соотношении 64/7/1 эффект увеличения скорости для диапазона частот 750–2500 кГц имеет отношения 4,4/3,5/1. Для более высоких частот зависимость эффекта увеличения скорости звука от степени заполненности среды клетками можно оценить сравнением эффектов увеличения скорости звука для сред с разными видами клеток, существенно различающихся объемными концентрациями, например: усредненными в третьоктавных полосах частот данными по всем видам клеток с объемными концентрациями $n \approx 2 \cdot 10^{-4}$ мл/мл с усредненными данными по видам, для которых $n \approx 2 \cdot 10^{-5}$ мл/мл. В этом случае уменьшение объемной концентрации на порядок соответствует уменьшению эффекта в среднем в 2,0 раза в полосе частот 1,7–11 МГц.

Интерпретация существующих данных затруднена отсутствием какой-либо модели обнаруженного эффекта. Оценки увеличения скорости звука в сгущениях фитопланктона, проведенные согласно теории простых смесей [11] в традиционных представлениях [12], заключающихся в том, что плотность вещества клеток больше плотности воды: $\rho_{кл}/\rho_{вода} \simeq 1{,}1$, а сжимаемость вещества клеток пренебрежимо мало отличается от сжимаемости воды, дает приращение скорости для использованных объемных концентраций всего лишь $\Delta C_{среды}/C_{воды} \simeq +(10^{-6}-10^{-5})$. Впрочем эта оценка носит формальный характер, так как упомянутые газовые полости в клетках фитопланктона уменьшают скорость звука на величину $\Delta C_{среды}/C_{воды} \simeq (10^{-5}-10^{-4})$ на всех частотах ниже резонансных частот полостей ($f < 5$–6 МГц) [8].

Можно предположить, что эффект связан со способностью водорослей структурировать среду между клетками, в частности органические остатки деления клеток и продукты метаболизма могут превращать среду в своего рода ячеистую структуру. Упругие свойства таких сред действительно обладают неравномерными частотными характеристиками. На справедливость такого предположения указывает характер зависимости $\Delta C(n) \sim n^{1/3}$, т.е. по сути изменение эффекта определяется расстоянием между клетками в среде.

Полученные в опытах зависимости $\Delta C(f)$ в диапазоне частот 75 КГц – 11 МГц весьма неравномерны. Как уже упоминалось выше, для некоторых видов клеток эффект

увеличения скорости исчезает в нижней части диапазона частот. Для всех прочих видов клеток эффект увеличения скорости звука имеет место во всем рассматриваемом частотном диапазоне. Зависимость $\Delta C_{\text{среды}}/C_{\text{воды}}$, полученная усреднением по всем данным измерений, в которых объемная концентрация биомассы имела один порядок величины: $n \sim (1-3) \cdot 10^{-4}$, и для которых эффект увеличения скорости существует во всем частотном диапазоне приведена на рисунке. На рисунке в двойных логарифмических координатах размещены усредненные значения измеренных превышений скорости звука и их среднеквадратичные отклонения. На оси частот отмечены диапазоны 150–225 и 500–750 КГц, в которых измерение скорости звука было затруднено из-за наличия в установке иных мод колебаний. Ось ординат имеет два направления с разрывом при значении параметра $\Delta C_{\text{среды}}/C_{\text{воды}} = 10^{-4}$.

Усреднение по всем имеющимся данным подчеркнуло наличие увеличения эффекта в области частот 340–500 КГц, где эффект весьма заметен, достигая величины $\Delta C_{\text{среды}}/C_{\text{воды}} \simeq +10^{-2}$.

Изложенные результаты приводят к выводу: сгущения фитопланктона являются весьма значащим акустическим фактором при гидролокации на рассматриваемых частотах ($\geqslant$ 75 кГц); границы их сгущений (с концентрациями, отмеченными in situ, $N \simeq 10^6$ кл/л) могут быть акустическими целями с силой цели до –60– –50 дБ.

Совокупность обнаруженных свойств цитопланктона: наличие управляемой нейтральной плавучести и рассматриваемый эффект увеличения скорости звука позволяет предположить, что так называемая тонкая структура на эхограммах возможно, в значительной части обусловлена наличием слоев сгущения фитопланктона с концентрациями клеток, существенно большими обнаруживаемых современными способами измерений (батометрия, флюориметрия). Во свяком случае, таким образом возможно объяснить наличие в океанах ЗРС с аномальным характером суточных миграций: опусканием в ночное время (прекращение фотосинтеза, уменьшение плавучести клеток) и с восстановлением их расположения в глубинах днем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Weston D.E.* Observations on a scattering layer at the termocliine // Deep Sea Res. 1958. V. 5. P. 44–50.
2. *Cushing D.H., Lee A.J. Richardson J.D.* Echotrasses associated with thermocline // J. Mar. Res. 1956. V. 15. № 1. P. 1–13.
3. *Watson Y.D., Meister R.* Ultrasonic absorption in water containing plankton in suspesion // J. Acoust. Soc. Amer. 1963. V. 35. P. 1584.
4. *Hansen P.G., Barham E.G.* Resonant cavity measurements of the effects of "Red Water" plankton on the attenuation of underwater sound // Limnol. & Oceanogr. 1962. V. 7. № 1. P. 8–13.
5. *Захарков С.П., Сандлер Б.М., Селивановский Д.А., Соколов А.Ю., Стародубцев Е.Г., Стунжас П.А.* Газовые пузырьки в море и фитопланктон // Океанология. 1991. Т. 31. № 4. С. 606–608.
6. *Крупаткина Д.К., Сандлер Б.М., Селивановский Д.А., Стунжас П.А.* Газовые пузырьки и морской фитопланктон. Реверберационные ультразвуковые измерения // Океанология. 1992. Т. 32. № 1. С. 92–100.
7. *Бурлакова З.П., Крупаткина Д.К., Сандлер Б.М., Селивановский Д.А., Стунжас П.А.* Газовые пузырьки и планктон. Волюмометрические измерения // Океанология. 1992. Т. 32. № 3. С. 481–486.
8. *Крупаткина Д.К., Сандлер Б.М., Селивановский Д.А., Стунжас П.А.* Газовые полости морского фитопланктона // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1992. № 3. С. 441–447.
9. *Сандлер Б.М., Селивановский Д.А., Стунжас П.А.* Газовые пузырьки в океане и фитопланктон // Тез. докл. Всесоюз. конф. "Проблемы метрологии гидрофизических измерений". М.: НПОНИИФТРИ, 1990. С. 404.
10. *Didenculov I.N., Selivanovsky D.A., Sandler B.M., Stunzhas P.A.* Influence of phytoplankton on sound propagation in the ocean // Proc. I.O.A. 1991. V. 3. Pt. 3. P. 215–223.
11. *Урик Р.Дж.* Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. С. 446.
12. *Хворов С.А.* Плавучесть и гидростатическая адаптация планктона. Автореф. дис. канд. биол. наук. Севастополь: Ин-т биологии южных морей АН Украины, 1985. 25 с.

Институт прикладной физики
Российской академии наук

Поступила в редакцию
18.02.92
После исправления
15.06.92

B.M. Sandler, D.A. Selivanovsky, P.A. Stunzhas

ACOUSTIC PROPERTIES OF PHYTOPLANKTON CONDENSATIONS

A new effect of sound velocity increase in the media containing phytoplankton is revealed. This effect is very significant and its average value attains $\Delta C/C < +10^{-3}$.

The measurements have been carried out using the phase method with alive phytoplankton at the volume cell concentration $\leqslant 10^{-4}$ within the frequency range from 75 kHz to 11 MHz.