

УДК 534.24.534.87.551.463.621.391

ВЛИЯНИЕ ПЕСЧАНЫХ ГРЯД НА ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА ОТ ДНА НА ОКЕАНСКОМ ШЕЛЬФЕ

© 1998 г. В. И. Воловов, А. И. Говоров

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 14.03.97 г.

Приводятся данные натуральных экспериментов, проведенных в шельфовом районе океана с одновременным использованием бокового обзора и вертикального зондирования дна. Выявлено существование на дне крупных песчаных гряд, близких к регулярным структурам, и отмечена резкая анизотропия характеристик сигналов, отраженных от дна при нормальном падении.

Большой объем экспериментальных данных, полученных в глубоком океане, свидетельствует о том, что осредненные характеристики сигналов, отраженных от дна при нормальном падении, изотропны, т.е. не зависят от азимутального направления горизонтально расположенной базы гидрофонов, принимающих звук, или от направления перемещения приемо-излучающей системы [1, 2]. Это объясняется изотропностью характеристик дна и, в частности, его микрорельефа. Действительно, свойства осадочного материала и динамика придонного слоя воды в глубоком океане таковы, что условия формирования регулярных и квазирегулярных структур типа гряд значительной протяженности здесь отсутствуют, хотя в отдельных случаях и наблюдаются знаки ряби небольшой амплитуды [3, 4]. Следует также иметь в виду значительный размер участка дна, формирующего отраженный сигнал при большой глубине. Как известно, при глубине места в несколько километров этот размер составляет сотни метров и более [2], и в его пределах сохранение регулярности микрорельефа (с точностью до величин порядка длины волны излучения) маловероятно. В то же время, как отмечалось в работе [1], на мелководье ситуация может быть совершенно иной.

Это демонстрируют более поздние экспериментальные данные, полученные нами на НИС "Петр Лебедев" на бразильском шельфе Южной Америки в точке с ориентировочными координатами $0^{\circ}20'$ ю.ш. и $47^{\circ}30'$ з.д. при глубине места около 38 м. Эксперименты проводились на ходу судна со скоростью несколько узлов с использованием гидролокатора бокового обзора (ГБО) типа "ГЭБО-100", встроенного в корпус судна (частота 100–110 кГц, ширина диаграммы направленности 2.5°), при одновременном вертикальном зондировании дна на частоте 9.6 кГц и при ширине диаграммы направленности преобразователей около 40° (модернизированный эхолот). По имев-

шимся данным осадок в районе проведения эксперимента был представлен средним и крупным песком с плотностью 1.90–2.05 г/см³ (пористость 40–33% соответственно), т.е. с параметрами, характерными для большинства шельфовых прибрежных районов океана [4].

При предварительном обследовании акватории с помощью ГБО было установлено, что рассеяние звука дном имеет ярко выраженный регулярный характер, при котором участки с интенсивным рассеянием периодически сменяются участками с практически полным отсутствием рассеянного сигнала. Это позволило предположить, что поверхность дна характеризуется неровностями типа песчаных гряд, вытянутых вдоль побережья и обусловленных движением придонных слоев воды. При дальнейшем проведении эксперимента курс судна первоначально был выбран строго перпендикулярно направлению вытянутости гряд, и в этом направлении было пройдено около 3-х км. Затем был осуществлен поворот судна на 90° вправо, в результате чего направление его движения совпало с направлением вытянутости. После прохождения этим курсом 3-х км он был изменен на первоначальный, и этим курсом было пройдено еще 3 км.

На рис. 1 представлены фрагменты стандартных яркостных записей дна, полученных с использованием ГБО на первых двух участках трассы движения судна. Записи относятся к левому борту судна в диапазоне наклонных дальностей регистратора 0–200 м. На рисунке указаны масштабы изображений по обеим осям. По оси абсцисс масштаб неравномерен. Курс движения судна соответствует направлению снизу вверх. Характер записи на третьем участке был полностью идентичен случаю а), что свидетельствует о сохранении регулярной структуры дна на площади не менее 20 км². Из рисунка видно, что на первом участке запись представляет собой систему почти

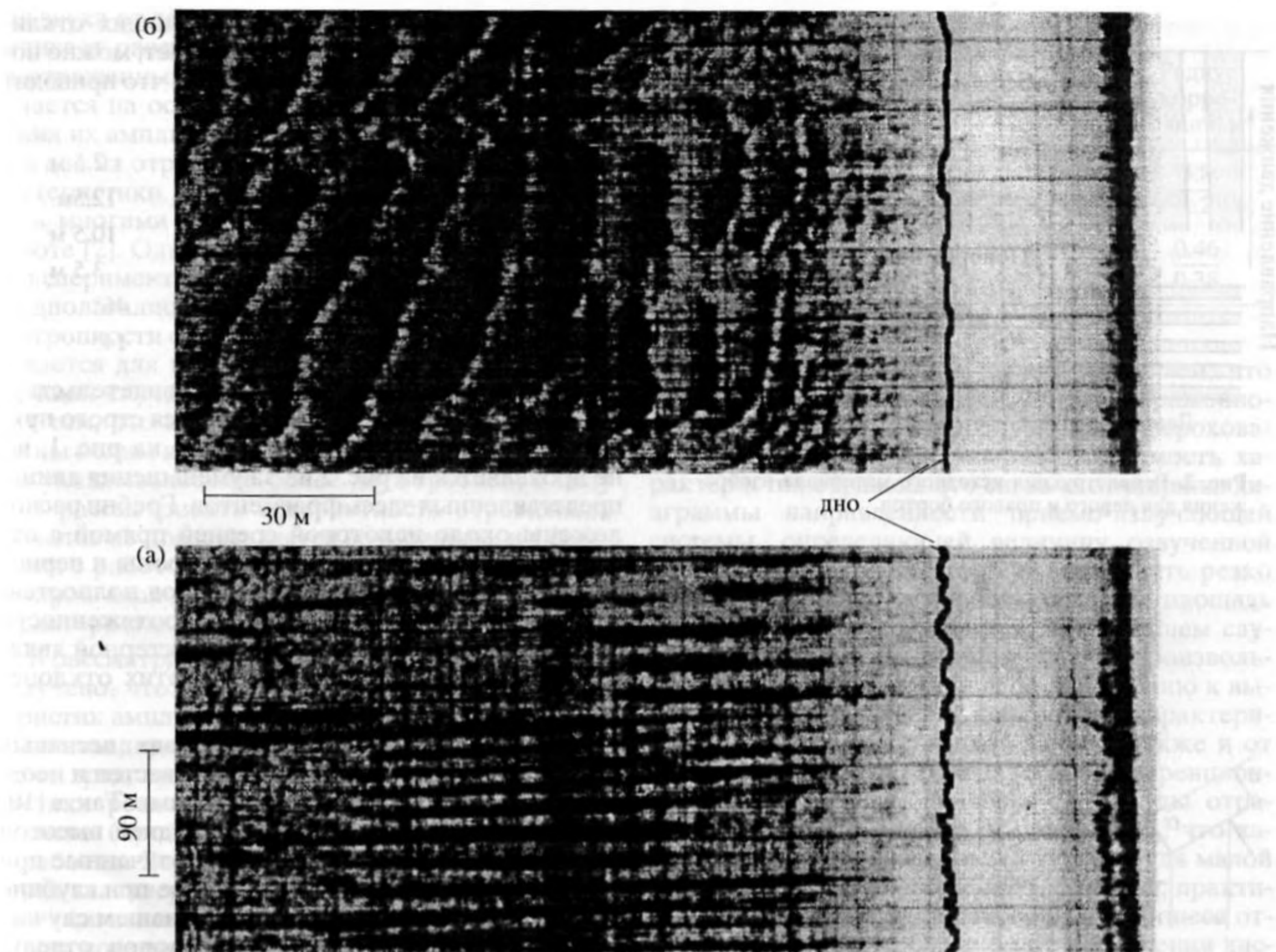


Рис. 1. Фрагменты записи дна, полученные с помощью ГБО с левого борта судна:

- а – первый участок трассы;
- б – второй участок трассы.

параллельных чередующихся темных и светлых полос, перпендикулярных направлению движения судна. При этом темные полосы (интенсивное рассеяние) соответствуют гребням гряд, а светлые – понижениям между ними. Это, по-видимому, объясняется тем, что гребни являются более “шероховатыми”, имея неровности микро-рельефа порядка 1.5 см (длина волны излучения ГБО) и более, в то время как понижения заполняются более жидким (высокопористым) осадком, нивелирующим микро-рельеф.

На втором участке записи отчетливо видно взаимное расположение гряд в направлении зондирования, причем, как показал анализ, ширина участков дна, интенсивно рассеивающих звук с левого борта, существенно превосходит эту величину для правого борта. Во всех случаях устойчиво регистрируется сигнал, отраженный от дна при нормальном падении, обозначенный как “дно” и обусловленный боковым лепестком диаграммы

направленности антенны, что позволяет фиксировать глубину места и таким образом определять профиль дна под килем судна по трассе его движения с высоким разрешением. Существующие методики обработки первичной информации, получаемой с помощью ГБО, позволяют преобразовать или реконструировать изображение дна с тем, чтобы получить количественные характеристики неровностей его поверхности. Эта обработка включает в себя выравнивание масштабов изображения по осям, выбор количества яркостных градаций, воспроизводящих изображение, отфильтровку случайных сигналов и помех и другие операции [5–7]. Результаты такой реконструкции применительно к рассматриваемому случаю представлены на рис. 2 в двух яркостных градациях как для левого, так и для правого бортов для уменьшенных по сравнению с рис. 1 фрагментов записи, но с увеличенным в 4.5 раза масштабе. Величины H_1 и H_2 (H'_1 и H'_2) на рис. 2а)

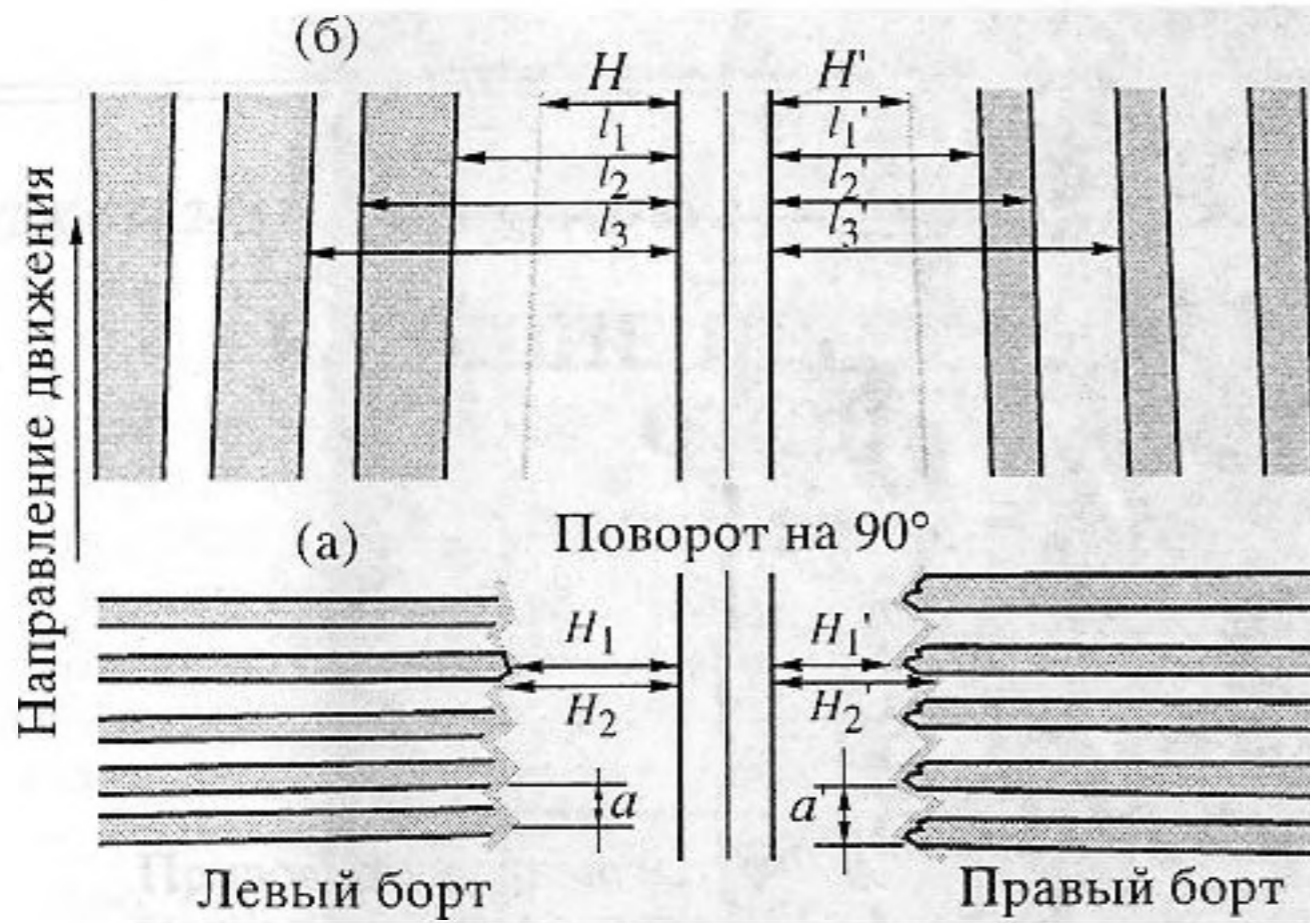


Рис. 2. Реконструкция исходного материала изображения для левого и правого бортов.

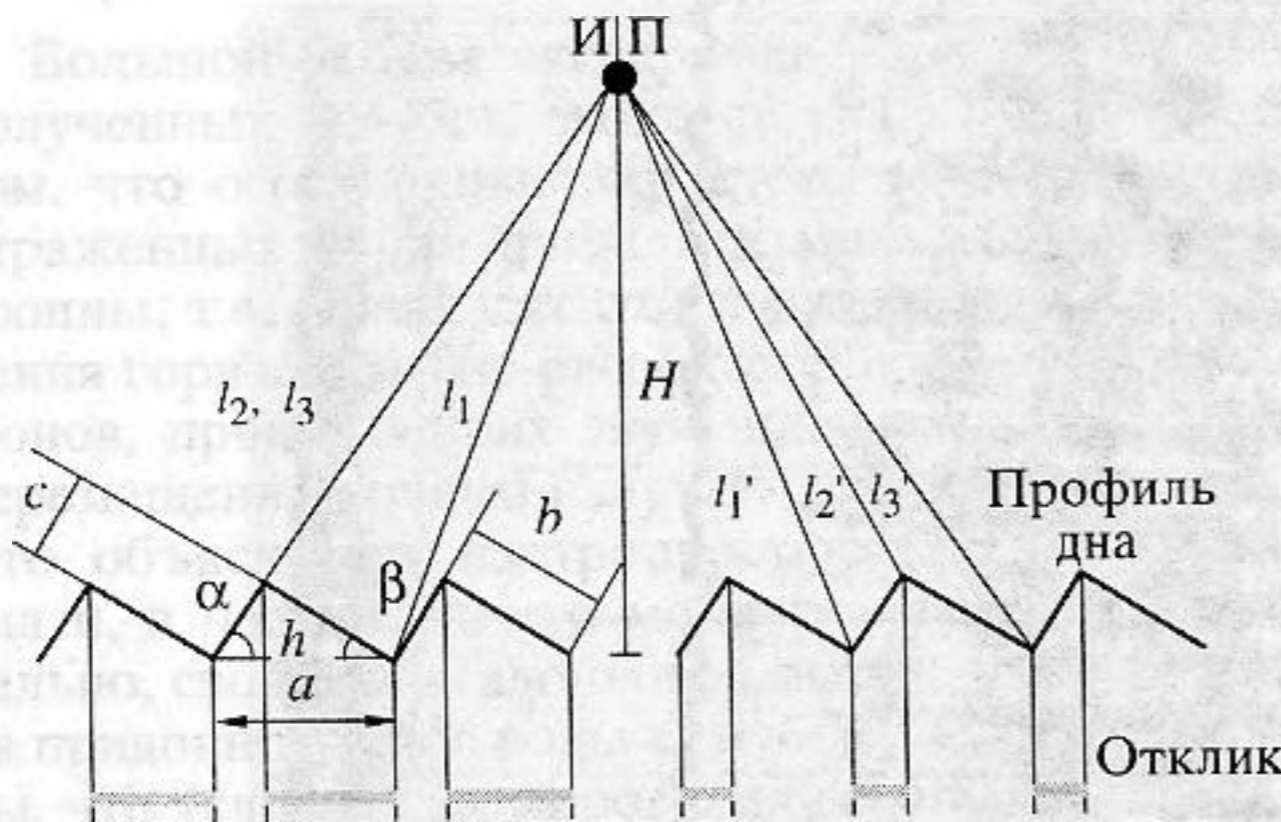


Рис. 3. Результаты дешифрирования полученного изображения.

представляют собой глубину места на гребне гряды и во впадине, а H на рис. 2б) – некоторую среднюю между ними. Величина a (a') характеризует пространственную периодичность рассеянного поля, т.е. период регулярной структуры неровностей, а величины l_1, l_2 и l_3 (l'_1, l'_2 и l'_3) представляют собой наклонные дальности от точки излучения–приема (ИП) до характерных особенностей изображения дна.

Переходя к дешифрированию результатов гидролокационной съемки (рис. 2), т.е. к получению конкретной количественной информации о характеристиках дна, и используя общепринятые предположения и методики [5, 8, 9], приходим к схеме, представленной на рис. 3 и соответствующей рис. 2б). Как видно, профиль отдельной гряды аппроксимирован треугольником несимметричной формы, что и обуславливает разницу в ширине участков повышенной интенсивности рассеяния с левого и правого бортов и что показано в нижней части рисунка предположительным меха-

низмом формирования соответствующих откликов. Используя геометрический расчет, можно получить средние параметры профиля, что приводит к следующим оценкам:

высота, h	2.5 м
период, a	12.5 м
длина пологого склона, b	10.5 м
длина крутого склона, c	3.5 м
угол наклона крутого склона, α	46°
угол наклона пологого склона, β	14°

Анализ первичного материала свидетельствует о том, что гребни гряд не являются строго прямолинейными. Это частично видно на рис. 1, но не проявляется на рис. 2 из-за уменьшения длины представленных здесь фрагментов. Гребни расположены около некоторой средней прямой с отклонением примерно 5 м в обе стороны и периодом в сотни метров (на рис. 1 период полностью не виден из-за недостаточной протяженности представленного фрагмента). Характерной является высокая коррелированность этих отклонений у разных гряд.

Факт существования такого рода песчаных гряд в шельфовых морях хорошо известен и неоднократно отмечался многими авторами. Так, в [10] приводятся данные о грядах со средней высотой около 6 м и периодом 300–450 м, полученные при эхолотном промере в Северном море при глубине 30 м. В этой работе, так же как и в нашем случае, отмечается несимметричность склонов отдельных гряд, однако угол наклона “пологого” склона составляет единицы градусов, а “крутого” достигает 20° . Аналогичная структура неровностей дна была зарегистрирована на банке Дожрджес, где также при глубине около 30 м были обнаружены гряды со средней высотой от 6 до 15 м и периодом 165–595 м и в других случаях. Песчаные гряды характерны для многих прибрежных шельфовых районов, причем, как правило, они вытянуты вдоль побережья. Особенность зарегистрированных нами гряд состоит в их относительно малом периоде и может представлять самостоятельный интерес для выявления механизма образования, устойчивости и многообразия рассматриваемых квазирегулярных структур.

Вопрос о влиянии неровностей дна типа гряд на отражение звука при нормальном падении ранее не рассматривался, хотя очевидно, что это влияние может быть существенным и, в частности, проявляться в азимутальной анизотропии средних характеристик отраженных сигналов. Имеющиеся данные относятся к отражению звука от дна, характеризующегося квазирегулярными неровностями типа небольших знаков ряби, на мелководье. Например, в [11] теоретически и экспериментально рассмотрена специфика отраже-

ния звука от дна в таком случае, хотя автор ограничивает рассмотрение вопросами когерентности отраженных сигналов, заключение о которой делается на основе анализа характера распределения их амплитуды. Влияние малых форм рельефа дна на отражение звука и статистические характеристики отраженного поля рассматривались многими авторами и, в частности, нами в работе [2]. Однако в приведенных теоретических и экспериментальных исследованиях неровности предполагались изотропными, что приводит к изотропности отраженного поля и хорошо оправдывается для глубокого океана (см. выше). Настоящий случай в корне отличается от упомянутых тем, что высота неровностей много больше длины волны излучения, а на озвученном участке дна укладывалось не более двух гребней, в силу чего рассматривать когерентность отраженных сигналов не представляется возможным, и в сравнении с работой [11] можно говорить лишь о некоторой аналогии в отношении анизотропности характеристик отраженных сигналов.

В рассматриваемых здесь экспериментах было получено, что закономерности изменения характеристик амплитуды отраженных сигналов резко различны для случаев движения судна вдоль и поперек гряд, причем в первом случае эти характеристики резко зависят от величины интервала времени (пройденного расстояния), взятого для обработки. Во втором случае наблюдается некоторая квазипериодичность флуктуаций отраженных сигналов, соответствующая расстоянию между соседними гребнями, их глубина существенно выше, чем в первом, а зависимость характеристик от времени осреднения практически отсутствует. Количественные характеристики амплитуды отраженных сигналов представлены в таблице, где вверху показаны результаты, полученные на дистанции 50 м, а внизу — 150 м.

Отмеченные особенности отражения звука легко объясняются тем, что при имеющейся структуре поверхности дна отраженный сигнал формируется в результате интерференции небольшого числа мощных отражений от склонов отдельных песчаных гряд, и его характеристики чрезвычайно чувствительны к фазовым соотношениям этих отражений. При этом в случае поперечного движения судна скорость изменения разности фаз является закономерной и максимальной, а осредненные характеристики отраженного сигнала вполне устойчивы и практически повторяются через расстояния, соответствующие пространственному периоду неровностей. В случае же продольного движения эти изменения имеют случайный характер, что обусловлено флуктуациями периода неровностей, рысканием судна на курсе и другими причинами. Тем не менее, изменение разности фаз в этом случае минимально и проявляется лишь на значительных расстояниях.

Таблица

Направление движения	Средний уровень (отн. ед.)	Коэффициент вариации, %	Радиус корреляции, м
Вдоль гряд	27	18	3.8
	$\frac{62}{62}$	$\frac{39}{39}$	$\frac{1.2}{1.2}$
Поперек гряд	78	49	0.46
	$\frac{69}{69}$	$\frac{51}{51}$	$\frac{0.38}{0.38}$

Ситуация дополнительно осложняется тем, что определенный вклад в интенсивность отраженного сигнала вносит микрорельеф дна (шероховатость гребней) и существенная зависимость характеристик отраженного сигнала от ширины диаграммы направленности приемо-излучающей системы, определяющей величину озвученной площади дна. При этом могут возникнуть резко контрастирующие ситуации, когда эта площадь больше периода неровностей, как в нашем случае, и когда меньше. В общем случае произвольного направления движения по отношению к вытянутости песчаных гряд конкретные характеристики отраженных сигналов зависят также и от азимутального угла. Исходя из интерференционного характера изменчивости амплитуды отраженного сигнала, можно предположить, что характеристики, приведенные в таблице для малой дистанции в случае движения вдоль гряд, практически случайны и не характеризуют процесс отражения в среднем. Однако при увеличении дистанции вследствие накопления и перераспределения разности фаз отдельных составляющих, определяющих суммарный сигнал, приведенные характеристики приближаются к некоторым средним, которым соответствуют и характеристики, получаемые при движении поперек гряд.

Основной вывод, который следует сделать из приведенных данных, заключается в том, что при районировании мелководных шельфовых акваторий океана по отражающим свойствам дна, выделяя участки с песчаным дном [2], в общем случае нельзя характеризовать их средними универсальными параметрами отраженных сигналов. При дальнейшем уточнении и совершенствовании районирования следует выделить и оконтурить участки с песчаными грядами значительной высоты (ориентировочно 0.5 м и более) и вывести их из общей схемы прогноза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воловов В.И., Краснобородько В.В., Лысанов Ю.П. Об изотропности корреляционных характеристик сигналов, отраженных от дна океана // Акуст. журн. 1978. Т. 24. № 6. С. 850–853.

2. Воловов В.И. Отражение звука от дна океана. М.: Наука, 1993. 272 с.
3. Богоров Г.В. Типы микрорельефа дна глубокого океана // Вопр. судостроения. 1977. № 8. С. 117–125.
4. Емельянов Е.М., Ильин А.В., Лисицын А.П. Типы донных осадков Атлантического океана: Океанологические исследования. Калининград. 1975. 579 с.
5. Богородский А.В., Яковлев Г.В., Корепин Е.А., Должиков А.К. Гидроакустическая техника исследования и освоения океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 264 с.
6. Говоров А.И., Деминский А.А., Малахов Б.М. О применении обзорно-поискового гидролокатора // Геодезия и картография. 1982. № 5. С. 32–37.
7. Hines P.S., Barry P.J. Measurements of acoustic backscatter from Sohm abyssal plane // J. Acoust. Soc. Amer. 1992. V. 92. № 1. P. 315–323.
8. Clifford P. Real time seafloor mapping // Sea Technol. 1979. V. 20. № 5. P. 22–24.
9. Riyait V.S., Lawlor M.A., Adams A.E., Hinton O.R., Sharif B.S. A review off the ACID synthetic aperture sonar and other sidescan sonar systems // The Intern. Hydr. Rev. 1995. V. 72. № 1. P. 115–124.
10. Ильин А.В. Геоморфология дна Атлантического океана. М.: Наука, 1976. 232 с.
11. Stanton T.K. Sonar estimates of seafloor microroughness // J. Acoust. Soc. Amer. 1984. V. 75. № 3. P. 809–818.

The Effect of Sand Waves on Sound Reflection from the Oceanic Shelf Bottom

V. I. Volovov and A. I. Govorov

Data of field experiments carried out in an oceanic shelf region with simultaneous side scanning and vertical sounding of the bottom are presented. The existence of large sand waves on the bottom, similar to regular structures, was detected and a steep anisotropy of bottom reflected signals at normal incidence was noted.