АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 1, с. 91–97

УДК 551.463.2

ЗВУКОРАССЕИВАЮЩИЕ СЛОИ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

© 2002 г. Л. Л. Тарасов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева
117036 Москва, ул. Шверника 4
E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 28.12.2000 г.

Статья посвящена анализу крупномасштабной горизонтальной изменчивости звукорассеивающих слоев (ЗРС) в северо-западной части Тихого океана. Работа основывается на результатах измерений автором в течение нескольких лет величин силы слоя и коэффициента объемного рассеяния на частотах от 0.63 до 16 кГц. Приводятся глубинно-частотные зависимости величины коэффициента рассеяния в различных районах указанной акватории. Показано, что наиболее заметные изменения в структуре ЗРС в описываемой части Тихого океана происходят на границах крупных водных масс или морей с различными гидрологическими характеристиками. В то же время в пределах таких водных масс или морей глубинно-частотная структура ЗРС остается относительно стабильной.

Несмотря на обилие данных о звукорассеивающих слоях (ЗРС), полученных за 50 лет изучения различными исследователями из многих стран мира, остаются открытыми многие вопросы о региональных особенностях пространственной и временнóй изменчивости полей объемного рассеяния в океане и окраинных морях. В данной работе сделана попытка обобщения результатов экспериментов, проводившихся автором в течение ряда лет в северо-западной части Тихого океана. В качестве основных характеристик, описывающих объемное рассеяние в толще воды, приняты коэффициент обратного рассеяния m_v и сила слоя M. Коэффициент m_v определяется как

$$m_v = W_S/(VI),$$

где W_S – мощность, рассеиваемая в обратном направлении объемом V в расчете на единичный телесный угол; I – интенсивность звука, падающего на этот объем. Сила слоя M – это интеграл по глубине от коэффициента m_v, чаще всего вычисляемый в пределах от поверхности до глубины максимального распространения ЗРС. Статья посвящена исследованиям пространственной изменчивости величин m_v и M в диапазоне частот 0.63–16 кГц.

Эксперименты по измерению характеристик объемного рассеяния проводились с использованием двух основных методик дистанционного зондирования толщи океана: взрывной и тонально-импульсной. Первая методика предусматривает применение в качестве источника звука взрывов толовых шашек (в нашем случае массой 200 г), обеспечивающих мощное широкополосное ненаправленное излучение, позволяющее обнаруживать ЗРС практически на любой глубине z в толще океана. Прием рассеянного сигнала в случае применения такой методики ведется на сферический ненаправленный гидрофон, размещаемый всего в нескольких метрах от центра взрыва, что, с учетом геометрии опыта, позволяет считать точки приема и излучения совмещенными и в дальнейшем при использовании термина "рассеяние" иметь в виду рассеяние обратное. Применявшаяся нами опускная система "Лесенка", разработанная в Акустическом институте, закреплялась на ходовом конце несущего кабель-троса и включала в себя приемный гидрофон с предварительным усилителем и 12 зарядов, в ходе эксперимента последовательно подрывавшихся дистанционно с борта корабля. Для обеспечения достоверности получаемых данных о величине коэффициента m_v и его зависимости от глубины взрывы проводились сериями по 5–6 на двух горизонтах, разнесенных на 300–1000 метров. В дальнейшем результаты по таким сериям усреднялись. В описываемых условиях 95-процентный доверительный интервал для рассчитываемых значений коэффициента рассеяния обычно не превышал 1.5–2.0 дБ. В начале эксперимента 1–2 взрыва осуществлялись ниже всех ожидавшихся ЗРС, то есть на глубинах 2.0–2.5 км, что позволяло определить примерную вертикальную структуру поля рассеяния и уточнить глубины проведения взрывных серий. Если позволяли условия, взрывные станции в одной точке океана проводились как днем, так и ночью, что давало возможность измерить параметры суточной изменчивости ЗРС, определяемой вертикальной миграцией биорассеивателей. Подробно взрывная методика и описание системы "Лесенка" приведены в [1]. При расчете зависимостей $m_v(z)$ с помощью взрывной методики

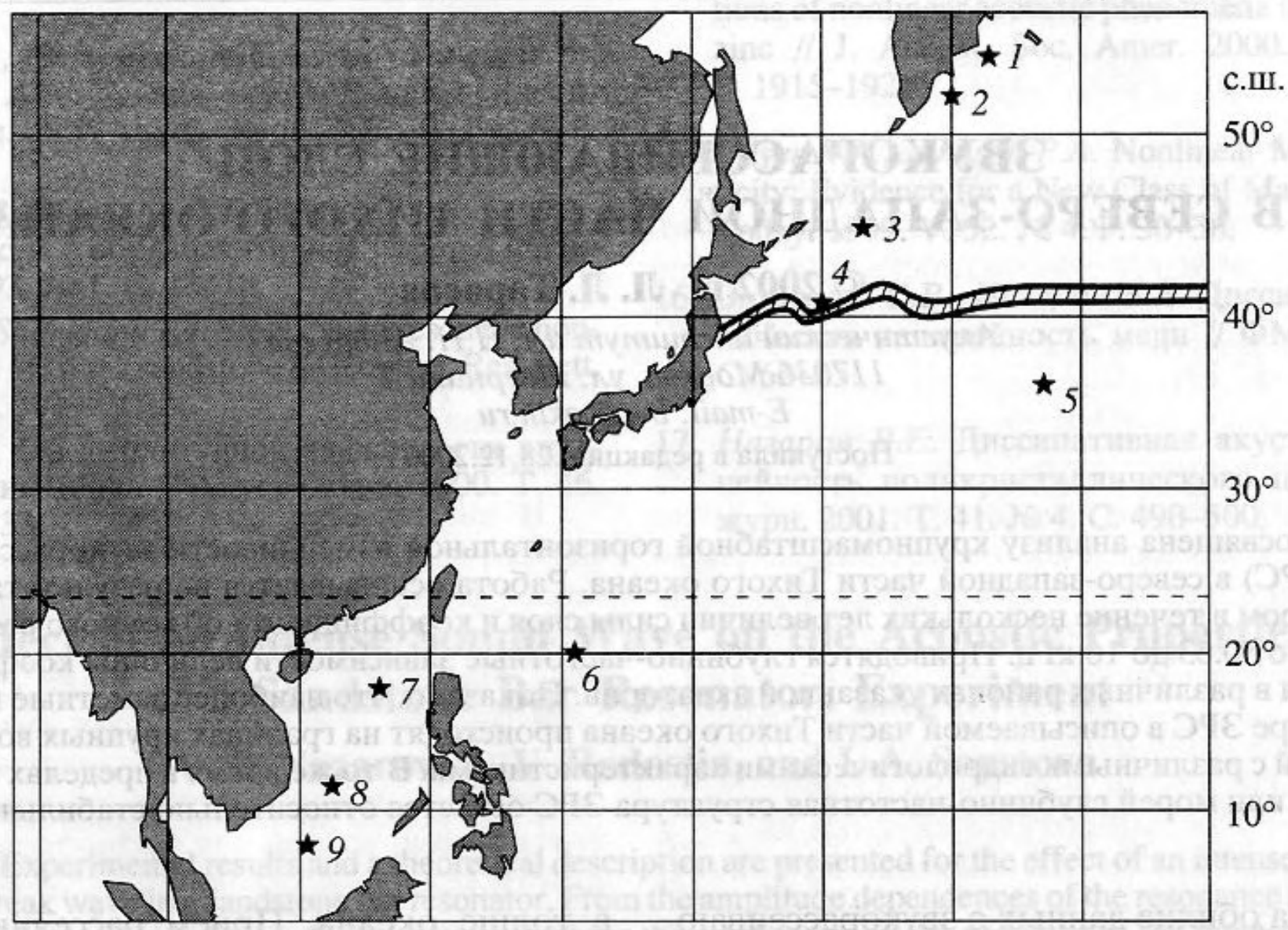

Рис. 1. Районы проведения экспериментов по изучению ЗРС в Северо-Западной части Тихого океана.

предполагается, что в пределах озвученного пространства рассеивающие свойства среды зависят только от глубины, то есть поле рассеяния имеет горизонтально-слоистую структуру. Кроме того, предполагается сферичность распространения взрывной волны, т.е. не учитывается изменчивость скорости звука с глубиной.

При использовании тонально-импульсных сигналов нами применялись направленные приемно-излучающие акустические антенны, обычно использовавшиеся в эхолотном режиме, когда ось диаграммы направленности располагается перпендикулярно невозмущенной поверхности океана. Полуширина главного лепестка диаграммы направленности антенн по уровню –3 дБ в диапазоне 3–8 кГц изменялась в пределах 5°–15°. Тонально-импульсная методика в использовании существенно проще взрывной, однако следует отметить, что применявшиеся направленные излучающие системы обеспечивали давление на оси около 2×10^4 Па (приведенное к 1 м) и при расположении у поверхности моря не всегда позволяли регистрировать ЗРС на больших глубинах, особенно на высоких частотах. Для $f \geq (8–10)$ кГц граница обнаружения слоев со средним уровнем рассеяния находится на глубинах около 1 км. Для зондирования ЗРС, более удаленных от поверхности, необходимо либо увеличивать длительность излучаемой посылки, что приводит к ухудшению пространственного разрешения, либо заглублять на несколько сотен метров саму антенну, что сильно затягивает время проведения эксперимента.

На рис. 1 звездочками обозначены центры районов проведения экспериментов в северо-западной части Тихого океана. В каждом из районов было проведено по 3–7 гидроакустических серий опытов с пространственным разнесением между ними в 20–50 км. Условия проведения опытов в районах 2 и 6 отличаются от указанных и будут описаны перед обсуждением полученных результатов. Заштрихованной полосой обозначено примерное расположение субарктической зоны фронтального раздела, являющейся границей между субарктической и западной тихоокеанской водными массами [2] с сильно различающимися гидрологическими, химическими и биологическими характеристиками. Эта фронтальная зона совпадает с областью столкновения двух течений: теплого Куросио и холодного Курильского (Ойясио).

Наиболее полные данные об особенностях ЗРС в Северо-Западной части Тихого океана были получены нами для Прикамчатской области (районы 1, 2 на рис. 1), где исследования велись с 1983 по 1990 год в весеннее, летнее и осеннее время, и было проведено несколько десятков серий гидроакустических опытов, как взрывных, так и тональных.

К характерным особенностям Прикамчатской акватории можно отнести, во-первых, практическое отсутствие суточных миграций ЗРС и связанную с этим малую изменчивость, не более 2–3 дБ,

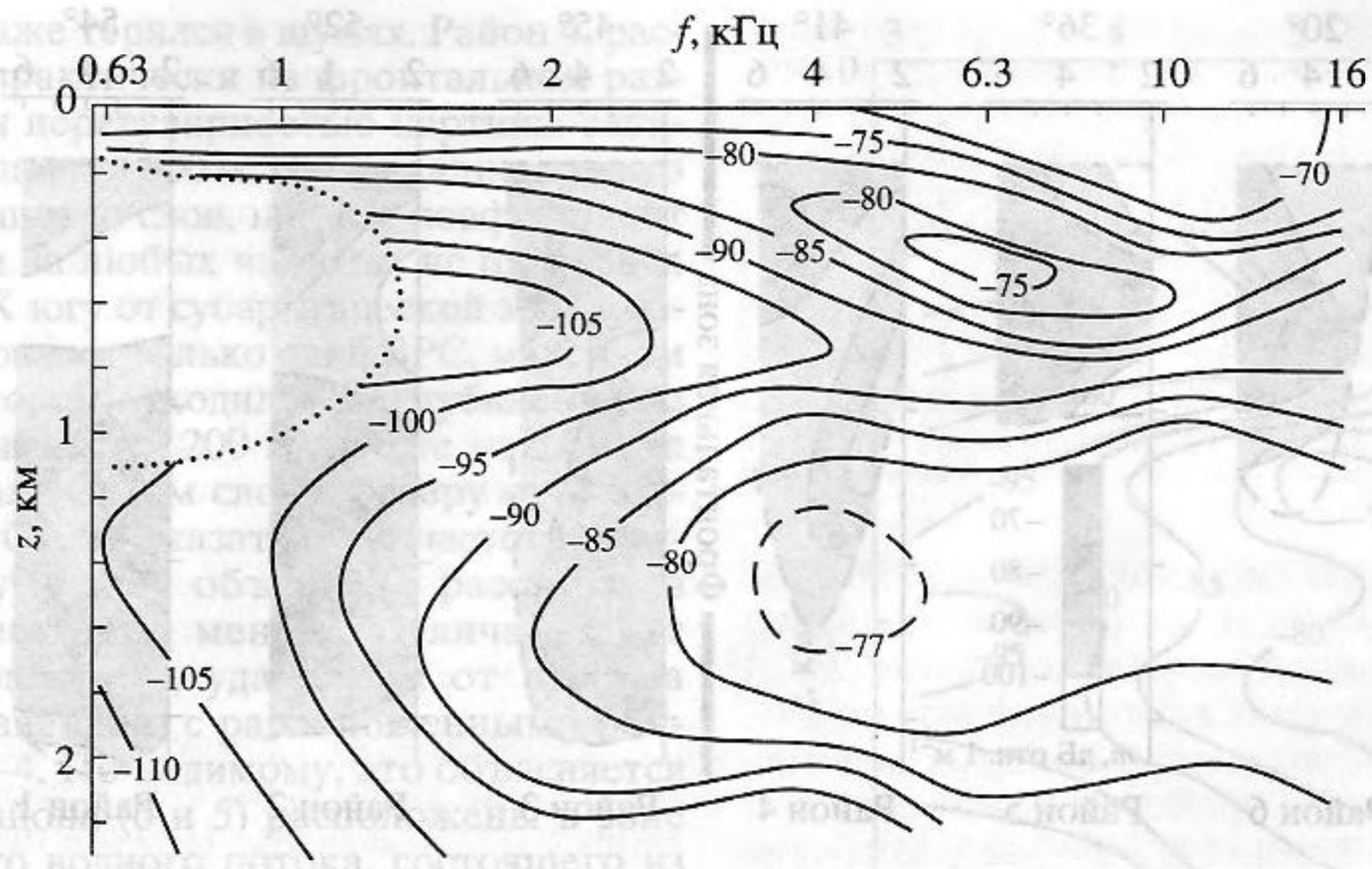

Рис. 2. Усредненная зависимость $m_v(z, f)$, характерная для района № 2 (у берегов Камчатки).

величин силы слоя во всем исследовавшемся частотном диапазоне от 0.63 до 16 кГц при переходе от дневного к ночному времени. Неизменность картины поля рассеяния в течение суток и ее малая изменчивость в Прикамчатской области позволяет представить характерную для акватории зависимость $m_v(z, f)$, полученную в мае 1986 года с использованием взрывной методики в районе 2 (площадь района около 20 тыс. км^2) расположенном, в основном, между побережьем Камчатки и Курило-Камчатским желобом). На рис. 2 эта зависимость показана в виде семейства линий равного уровня коэффициента объемного рассеяния с шагом в 5 дБ. Пунктиром в левой части рисунка выделена область, для которой не получено данных из-за слабости принятого рассеянного сигнала по сравнению с уровнем шума.

Второй особенностью описываемого района является наличие на частотах выше 2 кГц, глубинного слоя толщиной около 1 км, лежащего в диапазоне глубин от 1 до 2 км. Он имел слабо выраженный максимум на 4 кГц (отмечен штриховой линией) на горизонте около 1.4 км. Измерения, проведенные нами повторно у берегов Камчатки (район 1) в 1990 году с использованием опускавшихся до глубины 0.5 км направленных приемно-излучающих антенн в диапазоне 2–7 кГц, постоянно фиксировали глубинный слой, максимум рассеяния в котором колебался в диапазоне частот 3–4 кГц и лежал на глубине от 1.2 до 1.5 км. Величины коэффициента m_v во всем частотно-глубинном диапазоне практически не отличались от приведенных на рис. 2. Слой на глубине 300–500 метров на частотах выше 3 кГц наблюдался также стабильно. Следует отметить, что в других местах Мирового океана столь мощные по толщине и уровню рассеяния слои на глубинах более 1.5 км практически не наблюдались ни нами, ни другими исследователями.

Наконец, третьей особенностью описываемого района, отмеченной, правда, только в одной из экспедиций, являлось наличие в диапазоне частот 0.63–2 кГц слоя толщиной от 30 до 150 метров, примыкавшего непосредственно к поверхности океана и устойчиво наблюдавшегося в мае на акватории, расположенной между берегом Камчатского полуострова и Курило-Камчатским желобом. Обнаружение этого низкочастотного слоя было возможно только при облучении его снизу, т.е. при использовании глубинных взрывов, которые по техническим причинам проводились только в одной из экспедиций в Прикамчатской области. Зондирование толщи океана при помощи поверхностных взрывов не позволяло обнаружить этот тонкий слой, так как первые 200 мс после подрыва шашки приемный тракт гидроакустической системы не успевал выйти на линейный режим из-за перегрузок на выходе гидрофона, вызванных прохождением ударной волны. Сила приповерхностного слоя по крайней мере на 10–15 дБ превышала силу слоя толщи воды, лежащей ниже; она достигала величины –52 дБ (что соответствует среднему по толщине слоя коэффициенту рассеяния от –75 до –67 дБ) и оставалась практически неизменной в диапазоне 0.63–2 кГц. На частотах выше 2 кГц приповерхностные слои с коэффициентом рассеяния выше –75 дБ наблюдались практически на всей акватории Прикамчатской области, в том числе и мористее Курило-Камчатского желоба. Анализ показал, что зарегистрированный низкочастотный приповерхностный слой имел, скорее всего, биологическое происхождение. Зафиксиро-

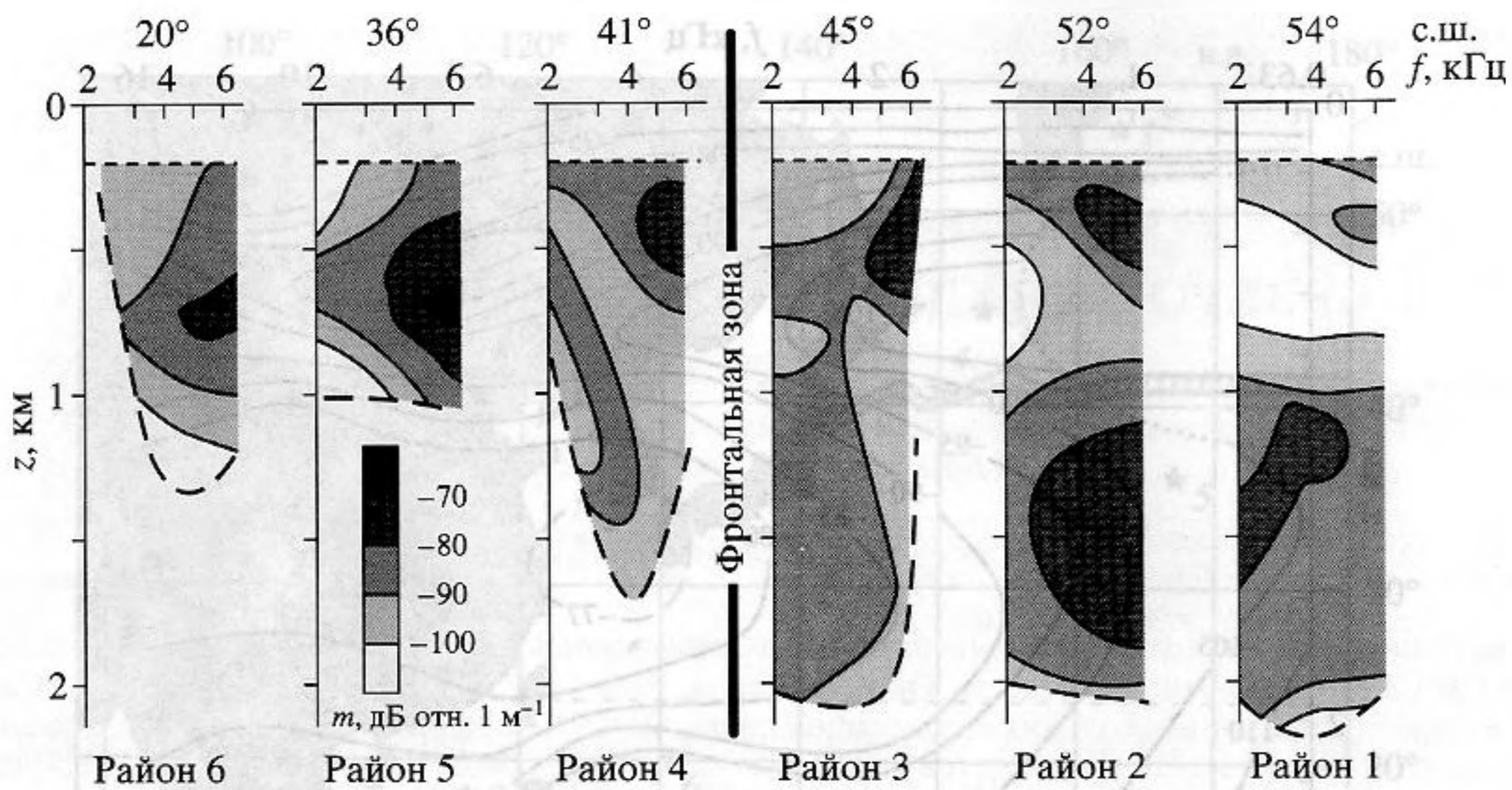

Рис. 3. Широтная изменчивость поля объемного рассеяния в Северо-Западной части Тихого океана.

ванный нами столь высокий уровень рассеяния на частоте 0.63 кГц по расчетам могли создавать крупные дискретные рассеиватели (пузырные рыбы длиной 30 и более сантиметров) с концентрацией примерно 2×10^{-4} м$^{-3}$. Неизменность величины M при $f = 0.63 - 2$ кГц говорит о том, что концентрация более мелких рыб должна расти не медленнее, чем $\sim l^{-2}$, где l – длина рыб. Учитывая, что описываемый приповерхностный слой рассеивателей был замечен в сезон нереста лососевых недалеко от побережья Камчатки, его существование, возможно, носит сезонный характер. К востоку от Курило-Камчатского желоба приповерхностный слой не был замечен ни в сезон нереста лососевых, ни в другое время года.

Исследования объемного рассеяния в Прикамчатском районе говорят о долговременной, по крайней мере, в течение 5–7 лет, стабильности таких параметров ЗРС, как абсолютные значения коэффициентов рассеяния и их распределение по глубине. Если считать, что поле объемного рассеяния стабильно во времени и в других районах океана, то различие в структуре слоев на пространственно разнесенных гидроакустических станциях можно связать со спецификой гидрологических и климатических условий. Такое предположение позволяет оценить параметры крупномасштабной пространственной изменчивости в северо-западной части Тихого океана.

На рис. 3 показаны частотно-глубинные зависимости коэффициента объемного рассеяния в районах 1–6 в светлое время суток. Все эти районы расположены в открытой глубоководной части океана, между ними практически нет островных дуг или донных поднятий, которые могли бы повлиять на структуру глубинных ЗРС. Однако между 5 и 3 районами расположена субарктическая зона фронтального раздела, разделяющая глобальные типы структур водных масс и лежащая примерно вдоль 41° северной широты. По гидрологическим данным влияние зон фронтальных разделов на соленость и температуру воды заметно до глубин 500–700 метров, а на больших глубинах скачков в широтной изменчивости этих параметров не наблюдается. Несмотря на то, что станции 1–6 имеют довольно большой разброс по долготе, исходя из направленности указанной границы раздела водных масс, будем считать, что рис. 3 характеризует широтную изменчивость поля объемного рассеяния. О справедливости такой интерпретации косвенно говорят результаты работ коллектива, в котором работает автор этой статьи, осуществившего районирование Атлантического океана по акустическим характеристикам ЗРС, в первую очередь, по величине силы слоя на частотах от 3 до 20 кГц [3, 4]. Было показано, что границы гидрологически однородных областей в Атлантике в ряде случаев можно рассматривать, как границы районов, отличающихся друг от друга статистическими параметрами полей величины силы слоя. Это позволяет предположить, что в широтном направлении параметры ЗРС в открытом океане имеют большую стабильность, чем в направлении меридиональном. Для облегчения сравнения графики равных уровней коэффициента m_v приведены в одних и тех же диапазонах частот (2.0–6.3 кГц) и глубин (0.2–2.2 км), при шаге между изолиниями в 10 дБ.

Как видно из рис. 3, к северу от субарктической зоны фронтального раздела (районы 1–3) всегда наблюдался ЗРС, располагавшийся в диапазоне глубин от 1 до 2 км. При приближении к фронтальной зоне (район 3) уровень рассеяния в этом глубинном слое спадал, а при $f > 5$ кГц при-

нятый сигнал даже терялся в шумах. Район 4, располагавшийся практически на фронтальном разделе, отличался нерегулярностью картины зависимости $m_v(z, f)$ при $z > 800$ м. Наблюдались только "остатки" глубинного слоя, причем коэффициент рассеяния в нем на любых частотах не превышал уровня –87 дБ. К югу от субарктической зоны раздела регистрировался только один ЗРС, максимум рассеяния в котором находился на глубине около 700 м, что примерно на 200 м глубже максимума рассеяния в аналогичном слое к северу от фронтальной зоны. Стоит сказать, что частотно-глубинная структура поля объемного рассеяния в районе 5 существенно меньше отличается от структуры в районе 6, удаленном от него на 4000 км, по сравнению с расположенными ближе районами 1–4. По-видимому, это объясняется тем, что оба района (6 и 5) расположены в зоне влияния единого водного потока, состоящего из Северного Пассатного течения и его продолжения Куросио.

Представленные на рис. 3 графики говорят о том, что частотно-глубинная структура поля объемного рассеяния претерпевает существенные изменения на границе двух водных масс и может рассматриваться как одна из биологогидрологических характеристик, присущих этим массам. Интересно, что резкая изменчивость гидрологических характеристик при переходе из одной водной массы в другую затрагивает только верхний 700-метровый слой воды, в то время как изменение структуры ЗРС наблюдается в водной толще до глубины 2000 метров.

Исследования ЗРС в низкоширотной области проводились в полузакрытом Южно–Китайском море и открытом Филиппинском, которое ввиду вовлеченности в динамику Северного Пассатного течения можно считать частью Тихого океана. В Филиппинском море работы велись в удаленном от берегов районе 6 с глубинами более 5 км. Расстояние между точками проведения двух серий опытов было около 100 км. В Южно-Китайском море измерения проводились в трех районах, отдаленных друг от друга на сотни километров. Район 9 расположен в небольшой котловине с глубинами около 2 км и практически окруженной со всех сторон рифами и мелководьем. Районы 7 и 8, хотя и разнесены примерно на 800 км, имеют сходные гидрологические характеристики: глубины около 4 км и относительно ровное дно. В районе 9 измерения велись в мае, в районах 7 и 8 – в октябре. В качестве примера на рис. 4 приведена структура поля рассеяния в дневное время, полученная в районе 8. В отличие от Филиппинского моря здесь, кроме слоя на глубине около 700 метров, наблюдался слой, расположенный на 200 метров ближе к поверхности. Похожая двухярусная структура была характерна и для других станций, проведенных в Южно-Китайском море. К сожалению, в описываемых южных морях исследования осуществлялись только с помощью направленных низкочастотных антенн, что позволило получить зависимости $m_v(z)$ в диапазоне 3–7 кГц до глубин около 1 км. Однако сравнение с данными других авторов, а также с взрывными измерениями, проведенными нами в низких широтах в других районах Тихого океана, позволяет предположить, что существование глубоководных слоев, подобных обнаруженным в Прикамчатской области, как в Южно-Китайском, так и в Филиппинском морях маловероятно.

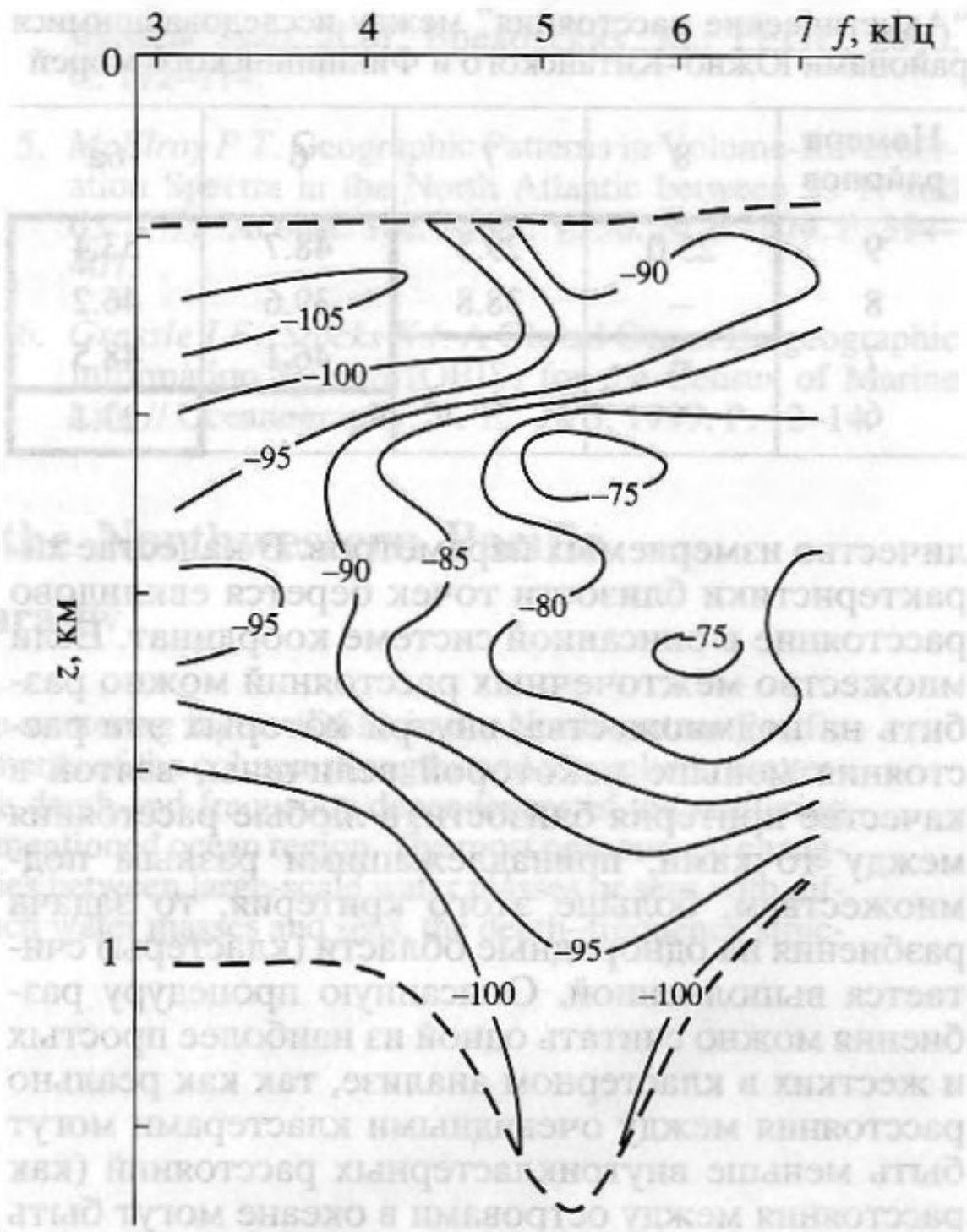

Рис. 4. Одна из глубинно-частотных зависимостей, полученных в Южно-Китайском море (район № 8).

Для количественной оценки того, можно ли считать, с одной стороны, Филиппинское и Южно–Китайское моря разными по характеристикам объемного рассеяния, а, с другой стороны, оценить однородность этих характеристик на каждой из рассматриваемых акваторий, была применена простая методика кластерного анализа, схожая с примененной еще Макелроем [5] для выделения однородных по характеристикам рассеяния районов в Атлантическом океане. Суть ее состоит в том, что для каждой точки акватории измеряются значения одного и того же набора параметров (в общем случае не обязательно гидроакустических), в дальнейшем рассматриваемого как координаты этой точки в N-мерном пространстве, где N – ко-

"Акустические расстояния" между исследовавшимися районами Южно–Китайского и Филиппинского морей

Номера районов	8	7	6	6а
9	25.0	29.5	48.7	53.4
8	–	38.8	39.6	46.2
7	–	–	46.1	48.5
6	–	–	–	23.1

личество измеряемых параметров. В качестве характеристики близости точек берется евклидово расстояние в описанной системе координат. Если множество межточечных расстояний можно разбить на подмножества, внутри которых эти расстояния меньше некоторой величины, взятой в качестве критерия близости, а любые расстояния между точками, принадлежащими разным подмножествам, больше этого критерия, то задача разбиения на однородные области (кластеры) считается выполненной. Описанную процедуру разбиения можно считать одной из наиболее простых и жестких в кластерном анализе, так как реально расстояния между очевидными кластерами могут быть меньше внутрикластерных расстояний (как расстояния между островами в океане могут быть меньше размеров самих островов).

Макелрой в качестве "акустических координат" экспериментальных точек брал значения силы слоя в дБ на 16 частотах в диапазоне от 1 до 31.5 кГц. В дальнейшем из этих значений вычиталась средняя по частоте величина M, рассчитанная для каждой серии опытов. Таким образом, вся акватория разбивалась на области с характерными частотными зависимостями силы слоя, т.е. с одинаковыми распределениями по величинам наборов биологических рассеивателей. Общее количество рассеивателей при разбиении на кластеры в расчет не принималось. Подобный подход не может также учесть отличия в вертикальной структуре ЗРС.

Нами в качестве координат рассматривались значения m_v на девяти глубинах от 250 до 1050 метров с шагом 100 м для четырех частот 3.15; 4.2; 5.2 и 6.2 кГц, то есть в 36-мерном пространстве. Нормировка проводилась на среднюю по всем 36 значениям величину коэффициента рассеяния. В таблице представлена матрица евклидовых "акустических расстояний" для трех районов Южно–Китайского моря (7–9) и двух – Филиппинского (6 и 6а). Районы 6 и 6а (район 6а на карте не обозначен отдельной звездочкой) пространственно были разнесены более чем на 100 км.

Как видно из таблицы, любые "расстояния" между точками, относящимися к каждому из морей, меньше любого "расстояния" между точками разных морей (три соответствующие группы выделены жирными рамками), что говорит об относительно малой изменчивости частотно-глубинной структуры поля рассеяния в пределах одного моря по сравнению с изменчивостью такой структуры при переходе из одного моря в другое. На практике при разбиении на однородные области часто применяются более мягкие критерии, чем использовавшийся нами. Например, критерии малости среднего расстояния между точками внутри кластера или удаленности этих точек от центра тяжести кластера по сравнению с расстоянием между центрами тяжести кластеров. Применение таких критериев привело бы к еще более четкому разделению матрицы расстояний на две компактные области, удаленные друг от друга.

Предложенная методика может быть использована при районировании Мирового океана по характеристикам ЗРС. Причем степень детализации районирования зависит от количества параметров, измеряемых в каждой географической точке, и выбираемых критериев близости этих параметров. Отметим, что задача такого районирования смыкается с весьма актуальной в настоящее время проблемой общего учета водных биологических ресурсов. Решению такой проблемы посвящены некоторые международные научные программы, в частности, широкомасштабная "Census of Marine Life" [6], предусматривающая создание глобальной Океанической биогеографической информационной системы (OBIS), основанной на многочисленных экспериментальных, в том числе акустических данных.

Все приводимые в статье результаты исследований говорят в пользу гипотезы о связи крупномасштабной пространственной изменчивости структуры ЗРС с глобальной изменчивостью гидрологических характеристик в Мировом океане, что отмечалось еще в работе [4]. При этом каждая из водных масс или закрытое море, по-видимому, характеризуется своей глубинно-частотной структурой поля объемного рассеяния, относительно стабильной в пределах рассматриваемого бассейна.

В заключение автор хотел бы выразить благодарность своим коллегам: И.Б. Андреевой – за чуткое руководство и многогранную, искреннюю помощью во всех моих начинаниях, Н.Н. Галыбину – за острые, плодотворные дискуссии и ценнейшие советы при проведении натурных экспериментов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 98-05-64849).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустика океана (под ред. Л.М. Бреховских). М.: Наука, 1974. 696 с.

2. Океанографическая энциклопедия. Л.: Гидрометеоиздат , 1974. С. 114–118, 528–533.
3. *Андреева И.Б., Галыбин Н.Н., Тарасов Л.Л., Толкачев В.Я.* Акустическая интенсивность слоев Центральной Атлантики // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 1. С. 21–27.
4. *Галыбин Н.Н., Тарасов Л.Л., Толкачев В.Я.* Пространственное распределение акустической интенсивности звукорассеивающих слоев по акватории Атлантического океана / Доклады VIII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2000. С. 112–114.
5. *McElroy P.T.* Geographic Patterns in Volume-Reverberation Spectra in the North Atlantic between 33°N and 63°N // J. Acoust. Soc. Amer. V. 56. № 2. 1974. P. 394–407.
6. *Grassle J.F., Stocks K.I.* A Global Ocean Biogeographic Information System (OBIS) for the Census of Marine Life // Oceanography. V. 12. № 3. 1999. P. 12–14.

Deep Scattering Layers in the Northwestern Pacific

L. L. Tarasov

Abstract—The large-scale horizontal variability of deep scattering layers (DSL) in the Northwestern Pacific is analyzed. The analysis is based on long-term measurements of the column strengths and the volume scattering coefficient for frequencies from 0.63 to 16 kHz. The depth and frequency dependences of the scattering coefficient are presented for different regions of the aforementioned ocean region. The most pronounced changes in the DSL structure are found to occur at the boundaries between large-scale water masses or seas with different hydrological characteristics. By contrast, within such water masses and seas, the depth–frequency structure of the DSL remains relatively stable.