

статистическими неоднородностями параметров среды;

– оценки угловых и временных параметров сигналов, точностей измерения этих параметров и их вероятностных характеристик;

– вклад рассеянного на статистических неоднородностях среды поля в засветке областей дифракционной тени;

– потери в показателях качества принимаемых сигналов из-за мультипликативной помехи, обусловленной флуктуациями параметров среды распространения;

– роль внутренних волн в среде распространения в изменчивости параметров принимаемого гидроакустического поля;

– учет в различных режимах методов подводного наблюдения и их алгоритмах быстрых и медленных мультипликативных помех, обусловленных статистической изменчивостью параметров среды распространения звука.

Результаты этих исследований использовались и используются при создании различных гидроакустических приборов и систем подводного наблюдения с требуемыми техническими параметрами и характеристиками. Кроме того, полученные статистические закономерности для параметров акустических полей, при распространении звука в статистически-неоднородной морской среде, представляют общефизический интерес и служат проверкой соответствующих теоретических исследований.

УДК 534.231

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ПОДВОДНЫХ ВОЛНОВОДАХ

© 1997 г. Н. В. Студеничник

Работы, выполненные в 1942 году в Черном море Н.Н. Андреевым, Л.Д. Розенбергом, Л.М. Бреховских и другими, положили начало отечественных исследований распространения звука в море.

Началом исследований в глубоких морях были опыты, проведенные в 1946 году Л.Д. Розенбергом и другими в Японском море, когда были обнаружены большие дальности распространения звука взрывных источников. Теоретическое обоснование дальнего распространения выполнено Л.М. Бреховских, и дана теория подводного звукового канала.

В 1951 году Л.Д. Розенбергом и Л.М. Бреховских был поставлен эксперимент по изучению в условиях Черного моря эффекта подводного звукового канала с использованием тонального непрерывного излучения на трассе от Сухумийского мыса до берегов Болгарии.

С 1950 по 1961 годы исследования распространения звука в море проводились, главным образом, на Черном море под руководством Ю.М. Сухаревского в рамках комплексных исследований гидроакустических сигналов и помех. В результате этих работ были, в основном, развиты современные методы постановки экспериментальных и теоретических исследований и физических обоснований явлений, возникающих при распространении звука в подводных волноводах. Полученные в Черном море закономерности оказались фундаментальными и в дальнейшем подтверждены в экспериментах в океанских волноводах.

В 1954 году А.Л. Соседовой в условиях берегового клина были обнаружены зона конвергенции на расстояниях 3–5 км и сильная засветка зоны тени, уровень звукового поля в которой только на 10–15 дБ был ниже сферического расхождения. Это противоречило теоретическим расчетам Х.Л. Пекериса, а в дальнейшем и И.Д. Иванова, согласно которым поле в зоне тени должно спадать по экспоненциальному закону, достигая уровня – 50 дБ уже на малых расстояниях от граничного луча.

Для обоснования полученных высоких уровней поля в зоне тени был привлечен Г.Д. Малюжинец, разрабатывающий к этому времени метод параболического уравнения (метод поперечной диффузии). Хотя с помощью этого метода не удалось объяснить явление (так как результаты теоретических исследований не имели, по существу, непосредственного отношения к наблюдаемому полю донных отражений в зоне тени), разработанный метод явился в дальнейшем основным и эффективным для расчетов звуковых полей в неоднородных волноводах.

В 1955 году по предложению Ю.М. Сухаревского образуется лаборатория под руководством Н.С. Агеевой в составе Н.В. Студеничника, Е.П. Мастерова, З.П. Гулина и других, всецело направленная на исследования распространения звука в море.

К этому времени в результате колоссальных усилий Ю.М. Сухаревского в районе Сухумского маяка вводятся в строй новые мощные излучаю-

щие системы, установленные на береговом склоне на глубинах 4, 25 и 80 м с рабочими частотами 4, 7, 15 и 36 кГц. Одновременно изготавливается большой набор переносных сегнето-электрических и магнитострикционных излучателей. Приобретаются исследовательские суда ("Зея", "Сигнал", "Ингур").

Постановка широких экспериментов в береговом клине и в открытом море в 1956–1961 годах с использованием новой экспериментальной базы и коротко-импульсного излучения на расстояниях до 30–50 км и более дало возможность детально изучить тонкую структуру звукового поля, исследовать характеристики поля в подводном звуковом канале, в зоне тени, во вторичных рефракционных зонах, дать физическое объяснение изменениям формы сигналов в условиях прибрежного клина, и в особенности в зоне тени. Удалось также разделить по времени и идентифицировать прямые, дифракционные сигналы и сигналы донных отражений и показать, что поле в зоне тени в условиях берегового клина обусловлено, в основном, донными отражениями; дифракционное поле незначительно и подчиняется закономерностям Х.Л. Пекериса и И.Д. Иванова.

Весной 1957 года ставятся опыты в открытом море в условиях образования резкого отрицательного градиента скорости звука у поверхности и образования резко выраженной зоны тени. Эти опыты показали, что дифракционное поле в зоне тени спадает по экспоненциальному закону и достигает уровня минус 40–80 дБ на небольших удалениях от расчетной границы зоны тени. Поле в зоне тени засвечивается донными отражениями, уровень которых зависит от свойств дна и характеристик направленности излучателя. В результате, принципиальный вопрос о природе звукового поля в зоне тени успешно разрешается.

Опыты 1956–1958 годов дали возможность детально исследовать энергетические характеристики и закономерности спада звукового поля с расстоянием в подводном звуковом канале, изучить форму, пространственно-временную структуру и закономерности прихода составляющих ее компонент в зависимости от расстояния и глубины приема. По предложению Ю.М. Сухаревского и Н.С. Агеевой введено понятие "многолучность".

На основании полученных данных по закономерностям спада оценено значение коэффициента поглощения звука в воде в исследуемом диапазоне частот и показано, что оно не менее чем в 2 раза ниже значений, имевшихся в литературе к тому времени.

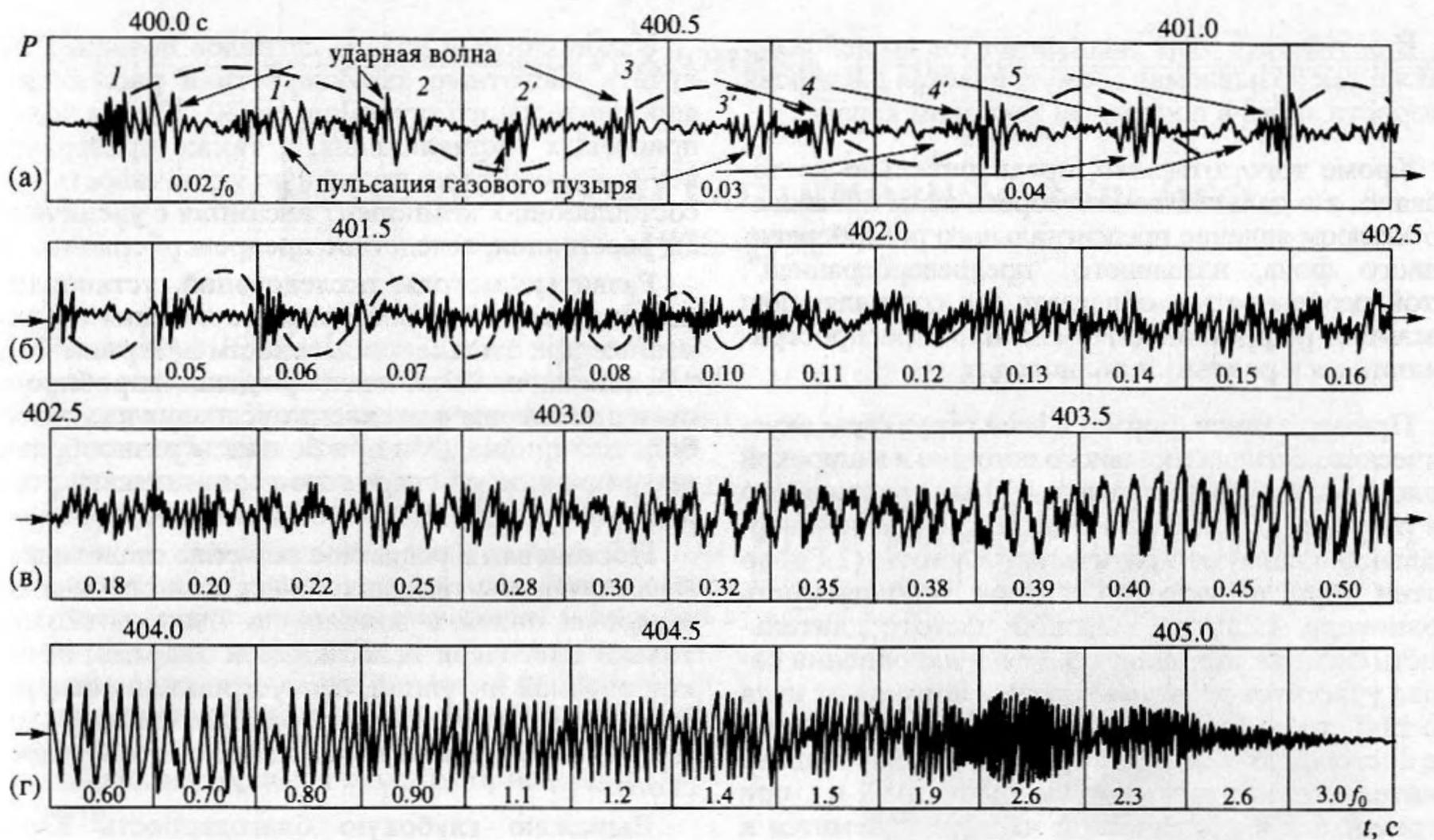
К 1958 году относятся исследования распространения звука в поверхностном однородном изотермическом слое. Здесь впервые было показано и физически обосновано, что изотермический поверх-

ностный слой ведет себя как волновод. Вводится понятие "приповерхностный" звуковой канал. Показывается, что в приповерхностном канале могут распространяться сигналы на расстояния, на порядок и более превосходящие расчетные границы, определяемые критерием, справедливым для однородного слоя. Более того, так как это не однородный слой, а приповерхностный канал, то распространение в нем осуществляется не по сферическому, а по цилиндрическому закону без ограничений дальности. Показано, что зона тени, при наличии приповерхностного канала, кроме донных отражений, засвечивается за счет рассеяния волн на шероховатостях поверхности.

В 1956–1958 гг. по предложению Ю.М. Сухаревского, под руководством Н.С. Агеевой проведены широкие исследования распространения звука в мелком море в диапазоне частот 4–36 кГц (район Нового Афона, Гудауты, Анапы, Батуми). Получены основные закономерности формирования поля в зависимости от гидрологических условий и свойств грунтов. Показано, что эффективный коэффициент затухания изменяется от 0.2–0.3 до 7–10 дБ/км.

Специально поставленные опыты по измерению частотно-угловых зависимостей коэффициента отражения звука от грунта в мелком море в диапазоне углов скольжения 7° – 83° при длительности посылок 2–3 мс показали, что в зависимости от типа грунта вариации коэффициента отражения для илистых грунтов лежали в пределах 0.1–0.3, а для песчаных – изменялись от 0.1–0.2 до 0.7–0.8.

В 1958–1962 годах проведены исследования амплитудной устойчивости не перекрывающихся во времени и не интерферирующих между собой отдельных приходов сигналов в подводном звуковом канале. Интересно было изучить истинную природу флуктуаций пучков, обусловленных только неоднородностями среды, и при этом для сигналов, большую часть своего пути проходивших в глубинных слоях. Показано, что абсолютная среднеквадратичная величина флуктуаций незначительна, не превосходит 10–15% и возрастает с расстоянием R по закону, близкому $\Delta I \sim R^{1/2}$. С использованием имеющихся теоретических расчетов (Л.А. Чернов и др.) и модели флуктуаций была поставлена обратная задача – определить параметры средних неоднородностей канала по пути акустического луча по величине флуктуаций. Выявлено, что среднеквадратичная величина показателя преломления и размер неоднородностей по траектории распространения (не осевых) лучей ($a\mu^2$) больше, чем на порядок, ниже тех характерных неоднородностей, которые были получены Л. Либберманом и другими авторами в океанских условиях и Г.И. Приймаком в условиях Черного моря в поверхностных слоях.



Форма взрывного сигнала в подводном звуковом канале (Черное море, 1964 г.). $R = 600$ км при глубине источника и приемника 50 м. По горизонтали отображено время распространения составляющих сигнала в секундах, по оси ординат — амплитуда сигнала. а, б, в, г — последовательные участки всего ансамбля сигналов. 1, 2, 3 и т.д. — отдельные приходы четверок сигналов ударной волны, 1', 2', 3' и т.д. — четверки сигналов первой пульсации газового пузыря. $f_0 = 100$ Гц.

Штриховая кривая, аппроксимирующая последовательность приходов ударной волны в начале ансамбля, отображает дисперсионную квазисинусоидальную зависимость отдельных приходов и их синфазное сложение, формирующее первую нормальную волну.

Полученные результаты позволили определить большую устойчивость звуковых пучков при распространении их на большие расстояния.

В 1959–1961 годах по инициативе и при непосредственном участии Ю.М. Сухаревского выполнена серия опытов в Южно-Китайском и Черном морях в условиях мелкого моря в инфразвуковом и звуковом диапазонах частот с использованием взрывных и тонально-импульсных источников звука при глубинах места от 30–40 м до 100–150 м. Были изучены частотно-энергетические и дисперсионные характеристики водных и грунтовых волн, закономерности спада. На основании полученных дисперсионных зависимостей определены характеристики и строение дна. Показано, что в грунтах скорость звука растет с глубиной от значений, близких к скорости звука в воде, до величин, превышающих ее в 1.08–1.14 раз. В осадочных слоях скорость звука в среднем увеличилась на 10%. В уплотненных (в западной части Черного моря) осадочных слоях отражение скоростей звука в грунте и в воде достигало 1.6, в коренных породах Южно-Китайского моря — 3.

В 1961 году ставится серия опытов по исследованию структуры звукового поля в условиях от-

крытых районов Черного моря с использованием тонально-импульсных и взрывных источников звука на расстояниях до 100–185 км. Были исследованы энергетические, пространственно-временные и дисперсионные характеристики волновода. Изучены частотно-угловые коэффициенты отражения звука от дна в диапазоне частот от 10 Гц до 3 кГц в диапазоне углов скольжения от 1° – 2° до 70° – 80° . Разработан метод определения коэффициента отражения от дна в пределах критических углов.

Результаты экспериментальных исследований пространственно-временных характеристик сигналов сопоставлены с расчетными, показана высокая степень совпадений. При постановке обратной задачи и определении расстояния до источника по структуре сигналов ошибка составляла не более 1–2%, что близко к определению дистанции другими методами.

На основе результатов этих опытов был разработан лучевой метод определения местоположения источника по структуре звукового поля, определены необходимые и достаточные условия решения обратной задачи.

В результате этих экспериментов исследована также так называемая геометрическая дисперсия скорости звука в подводном звуковом канале.

Кроме того, открыто, предварительно исследовано, а в дальнейшем и теоретически обосновано автором явление предсигнального реверберационного фона, названного "предреверберацией". Этой особенностью обладают все составляющие ансамбля рефракционных сигналов, распространяющихся в реальных волноводах.

Пример записи формы и всей структуры акустического сигнала взрывного источника в широкой полосе частот на расстоянии 600 км представлено на рисунке. Хорошо видна дисперсия (первой нормальной волны) от критической частоты (2 Гц) до сотен герц и частотно-угловая заполняемость волновода. Если на высокой частоте длительность сигнала составляет 5.3 с и в наполнении канала участвует весь спектр углов прихода от нуля до $\pm 14^\circ$, то по мере понижения частоты из спектра постепенно выпадают приосевые компоненты, длительность сигнала уменьшается и при стремлении к критической частоте стремится к нулю. Хорошо видно соотношение лучевого и волнового методов подхода к анализу структуры сигнала и получению его характеристик в волноводах.

Узкополосный анализ сигналов позволил получить частотные характеристики рассеяния и дополнительного затухания (до 30–40 дБ и более) приосевых составляющих, а также пространственно-временную и частотную устойчивость всех составляющих компонент ансамбля с увеличением расстояния, вследствие предреверберации.

Развитые методы исследований, установленные и физически обоснованные явления и полученные при этом закономерности в Черном море в дальнейшем были подтверждены, апробированы и расширены в океанских условиях на гораздо больших площадях и при большем разнообразии неоднородностей гидролого-геологических условий.

Постановка и успешное решение ставившихся задач фундаментального плана по исследованию звуковых полей в волноводах были возможны только благодаря неиссякаемой энергии, глубокой научной интуиции, целеустремленности, широте охвата проблемы и большим организаторским способностям Юрия Михайловича Сухаревского.

Выражаю глубокую благодарность Юрию Михайловичу Сухаревскому за научное руководство, постоянное внимание, обсуждение, помощь в физическом обосновании и интерпретации полученных результатов.