

гидроакустических исследований.

Эти исследования и разработки приборов, проводившиеся с начала 1948 года по 1970 год на Сухумской морской научной станции, положили начало аналогичным исследованиям в Мировом океане.

УДК 551.463

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ЧЕРНОМ МОРЕ

© 1997 г. Р. А. Вадов

Систематические гидроакустические исследования в Советском Союзе были инициированы профессором, доктором техн. наук Ю.М. Сухаревским и проводились в Черном море под его руководством с конца 40-х годов до 1975 года, когда организованная им Сухумская морская научная станция Акустического института приобрела полную самостоятельность.

Черное море представляет собой модель океана, в которой нашли отражение все его характерные (с акустической точки зрения) черты – глубокое море, подводный звуковой канал с перепадом скорости звука у дна и у его оси около 45 м/с, в зимнее время – приповерхностный канал с взволнованной верхней границей, континентальный склон, переходящий в шельф. Размеры Черного моря дают возможность проведения исследований дальнего (до 650 км) распространения звука, возможность организации наблюдений на стационарных трассах.

Вместе с тем Черное море – уникальное море, по некоторым своим характеристикам заметно отличающееся от других районов Мирового океана. Так, соленость его вод составляет 17–22‰, т. е. в 1.5–2 раза ниже солености океанских вод. На глубинах, превышающих 125–175 м, расположены воды, насыщенные растворенным в них сероводородом. Значение водородного показателя на разных глубинах в Черном море изменяется от 8.4 (у поверхности) до 7.6–7.7 (на глубине 2000 м). Своеобразный профиль изменения скорости звука с глубиной формируется как за счет зимнего охлаждения приповерхностных вод – ядро холодных вод летом находится на глубине 40–60 м, так и за счет сильного их опреснения – соленость вод меняется от 17–18‰ (у поверхности) до 22‰ (на глубинах 150–200 м и более).

Своеобразие профиля скорости звука и связанные с этим особенности временной структуры звукового поля в подводном звуковом канале Черного моря обсуждались ранее. Здесь пойдет

С 1962 года ученики Ю.М. Сухаревского продолжили исследования законов распространения звука в океане на судах акустического института АН СССР “Сергей Вавилов” и “Петр Лебедев”, а позже на судах “Академик Николай Андреев” и “Академик Борис Константинов”.

речь об энергетике звуковых полей и, в первую очередь, о некоторых результатах экспериментальных исследований поглощения и затухания звука в условиях Черного моря.

В 50-х годах исследования проводились на высоких частотах, когда поглощение звука в морской воде обусловлено релаксационными процессами, связанными с сернокислым магнием. Как одному из важнейших направлений гидроакустических исследований разработке лабораторных и натуральных методов измерения поглощения в морской воде, постановке систематических исследований поглощения звука в море Ю.М. Сухаревский придавал особое значение.

В Акустическом институте первые измерения поглощения звука в море методом реверберационного бака были выполнены В.П. Готовым в начале 50-х годов. Были проведены экспериментальные исследования влияния различных солей на поглощение в водном растворе сернокислого магния, теоретические исследования поглощения звука в электролитах и в морской воде. Была создана морская корабельная установка, позволяющая проводить измерения поглощения звука методом реверберационного бака в натуральных условиях.

В середине 50-х годов от метода реверберационного бака, когда возбуждение реверберационного сосуда (бака) с водой производилось шумовым (в полосе частот 5–10%) сигналом, перешли к резонансно-реверберационному методу. В этом случае в реверберационном сосуде возбуждались отдельные “наиболее долговзвучающие” моды, реверберационный сосуд помещался в вакуумный контейнер, а перед измерениями производилась деаэрация воды. Все эти меры были предприняты для снижения погрешностей проводимых измерений. В лабораторных условиях была проведена серия измерений коэффициента поглощения реальной Черноморской воды. Полученные на частотах от 30 до 210 кГц значения коэффициента

поглощения звука отличались от опубликованных к тому времени данных по океану в 1.6–1.8 раза. Были проведены контрольные измерения с океанской водой, с Балтийской водой (соленость 6–8‰), а также с образцами искусственной морской воды, различающимися соленостью. Измерения проводились при одной и той же температуре (20°C). Результаты этих измерений: независимость релаксационной частоты  $f_p$  от солености ( $f_p = 125$  кГц) и пропорциональность коэффициента электролитического поглощения солености, изменявшейся при проведении исследований в пределах от 3 до 40‰.

С целью определения зависимости релаксационного поглощения от температуры реверберационная колба с морской водой была помещена в термостат, в котором последовательно устанавливалась и поддерживалась температура 4, 10, 15, 20, 25 и 30 градусов Цельсия. В результате этой серии измерений была определена температурная зависимость релаксационной частоты.

На основе полученных экспериментальных материалов, с учетом теоретических представлений о релаксационных процессах в растворах электролитов была сконструирована формула для оценки коэффициента поглощения звука в морской воде с учетом ее температуры и солености. Литературные экспериментальные данные по поглощению ультразвука в морской воде за редким исключением достаточно хорошо описываются этой формулой.

Первые оценки коэффициента затухания звука в Черном море на частотах 10, 15 и 30 кГц (по материалам акустических опытов с цепочкой притопленных сферических буев) были получены в начале 50-х годов (Сухаревский Ю.М., Агеева Н.С.). Эти данные неплохо согласуются с предложенными формулами. Вместе с тем, для проведения систематических исследований поглощения звука на частотах 10–25 кГц был разработан метод, основанный на анализе многократно отраженных от дна-поверхности импульсных сигналов, излучаемых у поверхности и регистрируемых на приемный гидрофон, перемещающийся по глубине. Результаты измерений коэффициента поглощения на частотах от 10 до 25 кГц, выполненных по этой методике в Черном море, позволили сделать окончательный вывод о возможности экстраполяции упомянутых выше соотношений на частоты до 10 кГц.

На частотах ниже 10 кГц затухание определялось по отклонению экспериментального закона спада уровня звукового поля в подводном звуковом канале от цилиндрического закона геометрического расхождения, характерного для таких условий. На частотах от 1 до 10 кГц экспериментальные исследования проводились с использованием пьезокерамических излучателей. На частотах

от 100 до 2000 Гц использовались взрывные источники звука.

Полученные для этого диапазона частот значения коэффициента затухания звука в Черном море свидетельствуют о появлении заметных отклонений от поглощения звука, обусловленного сернокислым магнием, на частотах 4–6 кГц, с понижением частоты эти отклонения увеличиваются.

Материалы опытов по измерению затухания звука в Черном море представляются весьма интересными вследствие своеобразия химического состава его вод, в первую очередь солености, значений рН, их загрязненности сероводородом. Благодаря этим особенностям Черное море всегда привлекало исследователей уникальными возможностями для сравнения полученных для него и для океана данных. На основе сопоставления оценок затухания удавалось оценить правдоподобность гипотез, выдвигаемых для объяснения затухания звука в разных условиях.

В одной из серий опытов буксировка излучателя производилась на глубине 60 м, излучался шумовой (в 1/3-октавной полосе) сигнал с центральной частотой 4 кГц. Прием осуществлялся на глубинах 60 и 500 м. Горизонты приема и излучения были выбраны из соображения разделения эффекта поглощения звука для приосевых и для глубокорефрагированных лучей. По экспериментальным спадам были определены значения переходного расстояния. Для глубин приема 60 и 500 м они оказались равными 250 и 3000 м, соответственно. Коэффициент затухания определялся по спаданию звукового поля на горизонте 60 м (в канале). Однако, для кривых спада, полученных на горизонтах приема 60 и 500 м, несмотря на различие в уровнях звукового поля до 10–12 дБ, крутизны спада уровня на дистанциях, превышающих 40–60 км, практически не различались. Было сделано заключение, что растворенный сероводород на затухание звука в Черном море практически не влияет.

Одновременно с этим опытом был проведен аналогичный опыт со взрывными источниками звука для выяснения степени влияния водородного показателя рН на низкочастотное поглощение, объясняемое в настоящее время релаксацией бор-боратных комплексов. В предлагаемых разными авторами для описания поглощения звука на этих частотах соотношениях зависимость коэффициента поглощения  $\alpha$  от показателя рН дается в виде:

$$\alpha = \text{const} \cdot 10^{0.78 \text{ рН}}$$

Нами была реализована реальная возможность проверки выполнимости этого соотношения. Использовалась сильная изменчивость значений рН по глубине, характерная для Черного

моря. Максимальные изменения  $pH$  достигают 0.8. Таким образом, если приведенная выше зависимость низкочастотного поглощения от  $pH$  выполняется, то существуют в Черном море слои, которые различаются по коэффициенту поглощения в 4 раза.

Реально сигнал распространяется вдоль того или иного луча, пересекая водные слои, различающиеся значениями  $pH$ , значениями коэффициента поглощения. Каждый луч можно характеризовать средним за полный цикл коэффициентом поглощения, а следовательно и средним вдоль луча эффективным значением  $pH$ . Для горизонтов приема 60 и 250–500 м в соответствии с результатами расчета эффективные значения водородного показателя различаются на 0.3. Такое различие в  $pH_{эфф}$  приводит (при условии справедливости приведенной выше связи  $a$  с  $pH$ ) к различию в коэффициенте поглощения в 1.7 раза. Экспериментально на частотах 500–1250 Гц (в Черном море релаксационная частота процесса, связанного с бором, составляет около 800 Гц) было определено различие в коэффициентах затухания звука, оцененных при приеме в канале и на горизонтах

250 и 500 м в 1.5–1.9 раза. Такое согласие результатов эксперимента с расчетной оценкой можно расценивать как подтверждение существенного влияния водородного показателя  $pH$  на низкочастотный релаксационный процесс, связанный с бором.

В середине 80-х годов был обобщен накопленный экспериментальный материал по затуханию звука в таких различающихся температурой и соленостью вод морях, как Черное, Средиземное, Японское, а также в Северозападной части Тихого океана. В результате совместного анализа этого материала были сконструированы соотношения, несколько отличающиеся от предложенных в литературе, но достаточно хорошо описывающие низкочастотное поглощение звука в упомянутых регионах океана.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить глубокую признательность Юрию Михайловичу Сухаревскому за постоянный интерес к проводимым исследованиям, активное участие в обсуждении полученных результатов и их интерпретации.

УДК 551.463

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ ИМПУЛЬСНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В МОРЕ

© 1997 г. Э. П. Гулин

В конце 50-х годов в рамках выполнявшейся под руководством Ю.М. Сухаревского программы комплексных исследований гидроакустических сигналов и помех проводились экспериментальные исследования флуктуаций акустических сигналов в Черном море на полигоне Сухумской научной морской станции Акустического института. Полигон был оснащен установленными на склоне дна на разных глубинах (от 4 до 80 м) приемно-излучающими акустическими системами, которые в данных экспериментах использовались для излучения короткоимпульсных сигналов с тональным заполнением на частотах от 4 до 36 кГц. Поскольку уклон дна на глубинах до 400–500 м был достаточно большим, при направленном в вертикальной плоскости излучении фактически имитировались условия распространения звука в глубоком море, а влияние берегового клина было несущественным. Прием сигналов осуществлялся вертикальной цепочкой гидрофонов, опускавшихся с борта дрейфовавшего судна, которое переходило от точки к точке вдоль исследуемой трассы. Максимальное удаление от источников излучения составляло в разных экспериментах от 10 до 50 км.

Исследования проводились в разное время года при существенно различавшихся вертикальных распределениях скорости звука (ВРСЗ), что позволило получить данные о сезонной изменчивости интенсивности флуктуаций на трассе. В зависимости от сезона наблюдений, глубин излучения и приема реализовывались условия распространения звука при слабо выраженной слоистости, в приповерхностном и подводном звуковых каналах. Применение коротких импульсов длительностью 1–3 мс позволило добиться во многих случаях (в частности, при глубинах излучения и приема около 80 м) разделения по времени прихода сигналов, имеющих контакты с поверхностью моря, и сигналов, рефрагирующих в толще водной среды ("прямых" сигналов), а также сигналов, приходящих по отдельным лучам (или группам лучей с малой разностью времен запаздывания), на достаточно больших дистанциях.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что интенсивность флуктуаций как прямых, так и отраженных от морской поверхности импульсов существенно зависит от условий рефракции (вида ВРСЗ), дистанции, горизонтов