

УДК 623.983

А.В. ДЕРЕПА, канд. техн. наук (Центр. научн.-исслед. ин-т вооружения и военной техники, г. Киев)

## ГИДРОЛОГО-АКУСТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОРСКОЙ СРЕДЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ «ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЕ ВООРУЖЕНИЕ – НАДВОДНЫЙ КОРАБЛЬ»

Обосновано структурное построение комплексной системы «гидроакустическое вооружение – надводный корабль». Исходя из задачи систематизированного исследования условий ее эксплуатации с целью повышения эффективности, в работе рассматривается влияние гидролого-акустических особенностей морской среды на работу этой системы и обосновывается ее построение.

Обґрунтовано структурну побудову комплексної системи «гідроакустичне озброєння – надводний корабель». Виходячи зі задачі систематизованого дослідження умов її експлуатації з метою підвищення ефективності, в роботі розглядається вплив гідролого-акустичних особливостей морського середовища на роботу цієї системи та обґрунтовується її структурна побудова.

Coming from the task of the systematized research of external environments of the complex system the «hydroacoustic armament - surface vessel» with the purpose of rise of its efficiency, in work, is considered influencing of hydrologic-acoustic features of marine environment to work of this system and its structural construction is grounded.

Комплексная система «гидроакустическое вооружение – надводный корабль» предназначена для решения в нижней (подводной) полусфере в основном тех же задач по освещению обстановки, которые радиолокационные системы решают в верхней (воздушной) полусфере. При этом следует отметить, что определенная аналогия между гидроакустическими и радиолокационными системами справедлива только на уровне принципов их действия, стандартных процедур обработки сигналов и используемых средств отображения полученной информации. В то же время необходимо выделить и ряд фундаментальных отличий. К ним необходимо отнести следующее. Во-первых, это условия распространения гидроакустических сигналов, которые в значительной мере определяются гидролого-акустическими особенностями морских сред Мирового океана. Во-вторых, это методы излучения и приема гидроакустических сигналов, состоящие в том, что в гидроакустических системах, в отличие от радиолокационных, осуществляется не только управляемое распределение энергии в окружающем пространстве, но и преобразование одного вида энергии в другой, а именно: электрической энергии в механическую, а механической – в акустическую

в режиме излучения и акустической энергии в механическую, а механической – в электрическую в режиме приема. В-третьих, это характер помех работе гидроакустических систем: структурных, создаваемых кораблем-носителем гидроакустического вооружения, и морских, создаваемых морской средой и реверберацией моря.

Естественно, что в основу поиска рациональных структурных схем построения комплексной системы «гидроакустическое вооружение – надводный корабль» и их модернизации, а также исследования путей повышения эффективности этих систем должны быть положены знания, полученные в результате детального изучения перечисленных выше фундаментальных отличий.

**Гидролого-акустические особенности морской среды.** Гидроакустические волны являются единственным видом энергонесущих колебаний, способных распространяться в морской среде на большие расстояния. При этом они могут отражаться от естественных и искусственных неоднородностей в толще воды, а также от границ раздела морской среды «вода – морская поверхность» и «вода – морское дно». Этот физический феномен

© А.В. ДЕРЕПА, 2015

лежит в основе принципа действия гидроакустического вооружения различного назначения.

На распространение акустических колебаний в морской воде существенное влияние оказывают гидрофизические поля морей, характеризующиеся значительной пространственно-временной изменчивостью. К ним относятся следующие поля [1–4].

*Поле температуры* [2] характеризуется тем, что при средней температуре вод Мирового океана  $+3,8^{\circ}\text{C}$  оно может изменяться от  $-1,8^{\circ}\text{C}$  до  $+38^{\circ}\text{C}$ .

*Поле солености* [2], под которым понимается относительное содержание в воде всех растворенных в ней минеральных солей, может меняться от 31 до 38%. При этом состав солей регулируется растворимостью, сносом осадков с материков, процессами обмена с атмосферой и осадками дна, жизнедеятельностью организмов. В воде растворены также различные газы, поступающие из атмосферы и формирующиеся в самой водной толще.

*Поле плотности* [2] определяется плотностью морской воды, которая, в свою очередь, определяется температурой, соленостью и гидростатическим давлением. Для средних значений распределения плотности в океане это поле устойчиво стратифицировано с постоянным увеличением плотности при изменении глубины. Показателями устойчивости слоев является частота Вайселя  $N$ . Максимальных значений частота Вайселя  $N = 10^{-2} \frac{1}{c}$  достигает в слое скачка скорости звука, минимальное значение составляет  $N = 10^{-4} \frac{1}{c}$ .

В приповерхностных слоях морей толщиной в единицы и десятки метров наблюдается, как отмечено в работах [4–6], высокая концентрация воздушных пузырьков. Они образуются в результате разрушения поверхностных волн и разрыва сплошности среды в кильватерных струях кораблей.

В толще морских вод обитают биологические объекты. На некоторых горизонтах они образуют плотные скопления – звукорассеивающие слои протяженностью в сотни и тысячи километров. С закатом солнца слои поднимаются к поверхности на глубины 20–50, а на рассвете опускаются на глубины 300–400 м.

Морская поверхность характеризуется волнением. В верхнем слое глубиной до 50–60 м наблюдаются ветровые волны, имеющие высоту до 12–13 м. Большая часть энергии этих волн сосредоточена в полосе одной октавы.

На поверхности раздела слоев морской воды с различной плотностью возникают внутренние волны. Создавая значительные перемещения слоев воды, они активно влияют на изменчивость гидрофизических полей в пространстве и во времени. Низкочастотные внутренние волны имеют длины в десятки и сотни километров и высоту до 100 м. Кроме упомянутых волн в морях и океанах наблюдаются цунами, приливо-отливные явления, инерционные колебания.

Гидрофизические поля морей отличаются наличием однородных по свойствам слоев с толщинами от десятков до долей метра [3–5]. Эти слои отделены друг от друга граничными прослойками с резкими изменениями термодинамических характеристик. Вертикальные градиенты физических свойств в этих прослойках могут в 10–100 раз превышать их средние значения.

В океанах и морях существуют течения, представляющие собой поступательное движение водных масс. На отдельных участках скорость горизонтальных течений может достигать 10 узлов. Течения могут быть постоянными, временными и периодическими. По ширине и протяженности течения могут достигать сотен и тысяч километров на любой глубине Мирового океана. В морях наблюдаются такие явления, как турбулентность, синоптические и фронтальные вихри, вертикальное перемешивание.

Приведенные данные свидетельствуют о большом многообразии и разнообразии физических явлений и их параметров в водных массах морей и океанов. С точки зрения распространения звуковых волн в водных массах наиболее обобщенной характеристикой их является скорость звука [1, 3–5], причем наиболее полно акустические свойства морской воды характеризует комплексное поле скорости звука  $\tilde{c}(\omega, \vec{r}, t)$ , где  $\omega$  – круговая частота;  $\vec{r}$  – пространственный вектор;  $t$  – время.

Процесс распространения звуковых волн в упругой среде, какой является морская среда, описывается волновым уравнением

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \Delta \Phi,$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\Phi$  – потенциал скорости.

Как видим, характеристики звукового поля в морской среде полностью зависят от скорости звука в ней, которая выражается через параметры комплексного поля скорости звука [5, 7]. При этом вещественная часть комплексной скорости звука

соответствует скорости распространения плоской монохроматической волны, а мнимая – определяет затухание энергии звуковых колебаний.

Существуют два подхода к решению волнового уравнения, а именно, в рамках волновой и лучевой теорий [1, 3–5]. В рамках волновой теории используются функции, которые называются нормальными волнами, или модами. Каждая из них является решением волнового уравнения. Суммы мод составляют так, чтобы удовлетворить граничным условиям и параметрам источника звука.

В лучевой теории, которая справедлива для малых длин волн, используют представления о волновых фронтах и о лучах. Фронты характеризуются постоянными значениями фаз. Лучи ограничивают области распространения звуковых колебаний. В среде, где вертикальный и горизонтальный градиенты отсутствуют, траектории звуковых лучей представляют собой прямые линии. В морской среде, которая образована слоями с различными постоянными значениями скорости звука  $c_1, c_2, \dots, c_n$ , луч рефрагирует. Углы скольжения лучей  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  на границах слоев связаны со значениями скорости звука  $c_1, c_2, \dots, c_n$  законами Снеллиуса для каждого луча:

$$\frac{\cos \theta_1}{c_1} = \frac{\cos \theta_2}{c_2} = \frac{\cos \theta_3}{c_3} = \text{const.}$$

В связи с большим диапазоном изменчивости поля скорости звука ее обычно разделяют на две составляющие: регулярную и случайную. Регулярная составляющая наиболее четко выражена на вертикальном распределении скорости звука (ВРСЗ), особенности которого в разных районах Мирового океана демонстрируют графики на рис. 1 (1, 6 – Атлантический океан; 2 – Тихий океан; 3, 5 – Индийский океан).

На графиках выделены четыре слоя: I – приповерхностный слой; II – слой сезонной изменчивости; III – слой уменьшения регулярной составляющей; IV – слой увеличения регулярной составляющей. Границы этих слоев в разных районах и в разные сезоны находятся на различных глубинах. Наиболее изменчивым является приповерхностный слой глубиной до 100–200 м. В этом слое знаки вертикальных градиентов могут изменяться на противоположные в обе стороны. Слой сезонной изменчивости глубиной 200–500 м принято рассматривать по четырем сезонам года. За время между сезонами знаки вертикальных градиентов могут изменяться на противоположные. В слое III происходит регулярное уменьшение средней ско-

рости звука с глубиной без изменения знака. Во многих случаях на границе между слоями III и IV значение скорости распространения звука достигает минимальной величины. Глубину этой границы называют осью подводного звукового канала (ПЗК). Слой IV характеризуется монотонным увеличением скорости звука с глубиной.

Для полного описания особенностей распространения низкочастотных и инфразвуковых волн в морских средах необходимо иметь информацию о скоростях распространения звука в придонных слоях и коренных породах дна [1, 8, 9].

Скорость распространения продольных и поперечных волн в грунте зависит от его физико-механических параметров, пористости, плотности, состава частиц, количества и вида содержащихся в осадках газов и других факторов. В обобщенном виде скорость звука в слое рыхлых осадков составляет  $c_2 = 1,6 \div 2,5$  км/с, в слое уплотненных осадков –  $c_2 = 3,5 \div 5,5$  км/с, для базальтов –  $c_2 = 6 \div 7$  км/с. Поперечные волны быстро затухают.

Приведенный выше анализ физических свойств морских сред и связанного с ними поведения комплексного поля скорости звука, в особенности его вертикального распределения, обусловлен той ролью, которую играет этот параметр в формировании наиболее интересных и важных с точки зрения военной гидроакустики особенностей акустического поля в морских условиях. Наглядное проявление этого влияния демонстрируют графики на рис. 2 [1], где с помощью лучевых картин

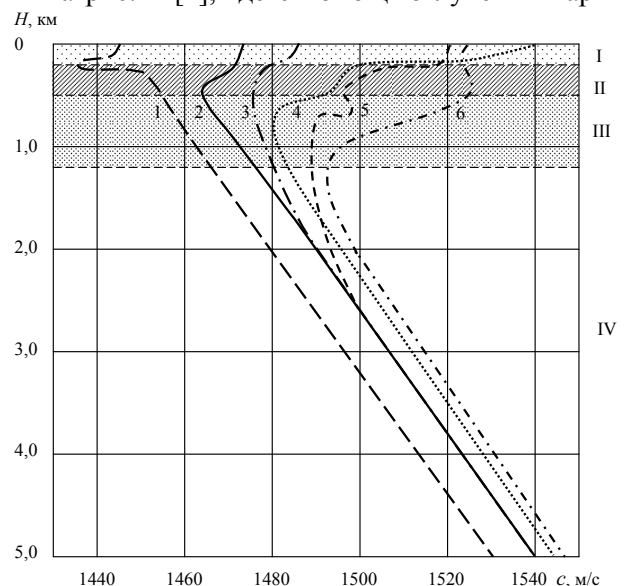


Рис. 1. Вертикальное распределение скорости звука в Мировом океане

представлены эти особенности (II) в зависимости от характера ВРСЗ (I): *a* – зона тени при отрицательной рефракции; *б* – зона тени и освещенности при положительной рефракции; *в* – слой скачка и приповерхностный канал; *г* – дальние зоны и подводный звуковой канал; *д* – мелкое море. При этом особенности расположения подводных объектов обозначены цифрами 1–4.

Как следует из рис. 2, наиболее широкий диапазон изменчивости скорости звука характерен для приповерхностного слоя. В этом же слое чаще всего размещаются приемные и излучающие устройства системы «гидроакустическое вооружение – надводный корабль».

Анализ качественного характера распределения энергии звукового поля показывает, что при

постоянном отрицательном градиенте скорости звука (рис. 2, *a*) все лучи изгибаются вниз. Для источника звука на глубине *d* существует такой луч, который, выйдя из него под углом  $\theta_m$  к горизонтали, касается поверхности. Любой другой луч, который выйдет из источника под углом, большим  $\theta_m$ , будет падать на морскую поверхность и отражаться в направлении дна. Как видно из рис. 2, *a*, ни один из лучей не может попасть в зону тени справа от предельного луча. Сюда может попасть лишь звуковая энергия за счет отражения от морской неровной поверхности или дна. В зоне тени уровень излученного сигнала уменьшается более чем на 100 дБ. При увеличении скорости звука с глубиной (рис. 2, *б*) возникает положительная рефракция лучей, их многократное отражение от морской поверхности

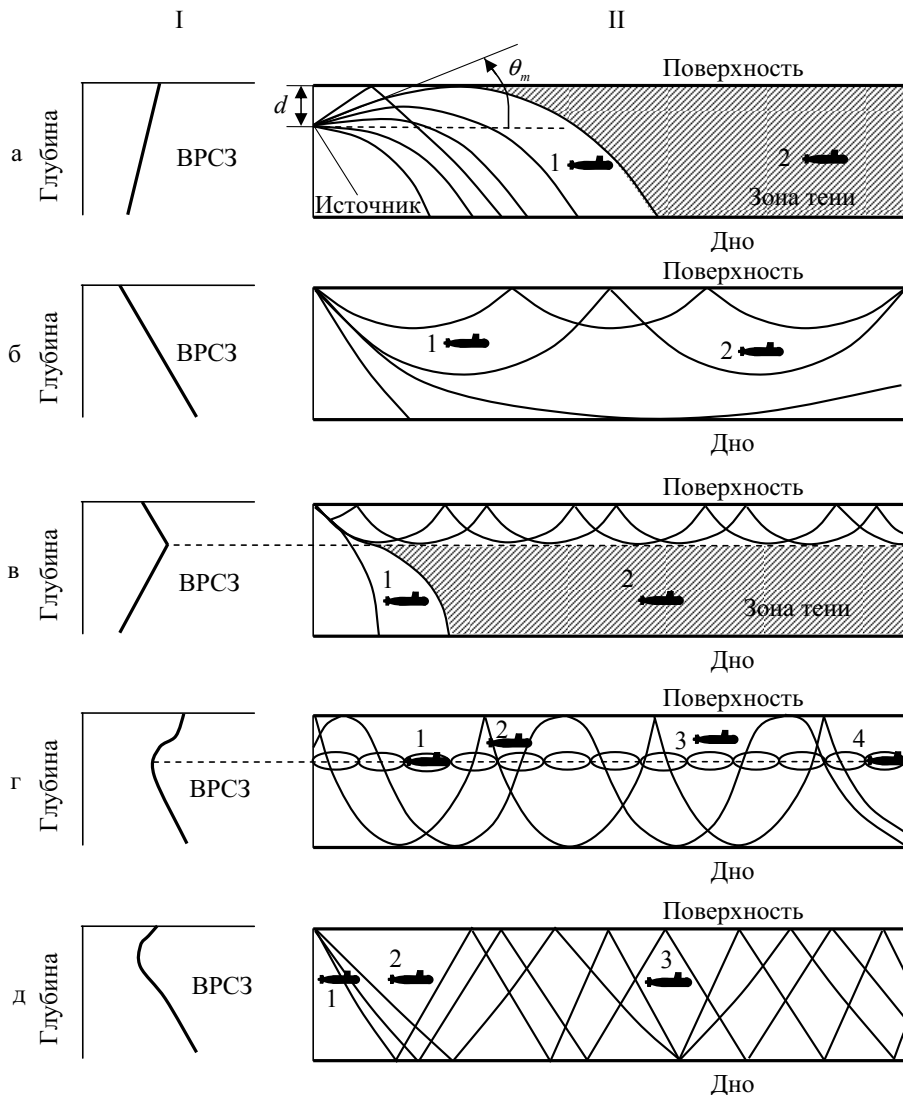


Рис. 2. Особенности акустического поля в зависимости от вертикального распределения скорости звука

образует зоны тени и освещенности. При наличии в распределении скорости звука угла излома (рис. 2, в), когда небольшая положительная рефракция лучей резко изменяется на отрицательную, возникает слой скачка.

Слой скачка образуется при интенсивном ветровом и конвективном перемешивании поверхностного слоя или при наложении друг на друга двух масс воды различного происхождения. Слой температурного скачка (термоклин) обычно возникает при сильном прогревании верхнего слоя воды и его ветровом перемешивании. Слой скачка солености (галоклин) и плотности (пикноклин) образуется при распространении по поверхности моря пресных вод материкового стока или образующихся при таянии льдов. Мощность слоя скачка колеблется от нескольких метров до нескольких десятков метров, а величина вертикального градиента в нем может превышать по температуре 8–10 °С на метр, по солености – 5‰ на метр, по плотности – 0,05–0,07 кг/м<sup>3</sup> на метр. Слой скачка характерен для небольших глубин моря. В отдельных случаях по вертикали может располагаться несколько слоев скачка.

До слоя скачка при положительной рефракции акустических лучей возникает их многократное отражение от поверхности моря, результатом чего является появление приповерхностного звукового канала. В нем увеличивается (до 8–10 дБ) уровень акустического сигнала, а на средних частотах (5–10 кГц) он уменьшается при волнении поверхности моря более 6 баллов. При переходе через слой скачка уровень акустического сигнала уменьшается на 20–30 дБ.

Переходная область в составе термоклина (рис. 2, г), представляющая собой изотермический слой, создает в море эффект акустической линзы. Если источник звука расположен в точке с минимальной скоростью звука, то лучи, выходящие из него, будут осциллировать вверх и вниз относительно горизонта источника. Глубину минимальной скорости звука называют осью подводного звукового канала. Регулярная смена положительной и отрицательной рефракции лучей с полным внутренним отражением на горизонтах, где скорость звука больше минимального значения на оси канала, обуславливает увеличение до 10 дБ уровня сигнала в канале и на порядок – расстояние по сравнению со сферическим законом. При существовании в морской среде профиля скорости звука, подобного изображенному на рис. 2, г, лучи, выходящие из источника звука, находящегося выше или ниже оси,

осциллируют относительно оси канала. Изображенные на рис. 2, г лучи периодически возвращаются к поверхности моря в узких диапазонах по дальности, которые называются зонами конвергенции.

Условиями существования зон освещенности является достаточно большая глубина моря, а скорость звука у дна должна быть равной или большей, чем у поверхности моря. Нерегулярная смена положительной и отрицательной рефракции лучей при полном внутреннем отражении от поверхности и дна моря обуславливает значительную (до 25 дБ и более) аномалию в приповерхностном слое с периодическим чередованием (20–70 км) зон (шириной 5–15 км) повышенной интенсивности и тени на расстояниях до 2000–5000 км.

Особо следует выделить вопрос о тонкой структуре звукового поля в глубоком и мелком морях [3–5]. Это связано с тем, что мелкое море может иметь зоны тени, слой скачка и приповерхностный канал одновременно. Но условия распространения звука при этом будут отличаться от условий глубокого моря. Многократное изменение параметров отрицательной и положительной рефракции с многократным отражением лучей от поверхности и дна моря обуславливают высокую степень пространственно-временной изменчивости уровня и фазы сигнала с замираниями до 50 дБ.

**Влияние гидролого-акустических характеристик морской среды на структуру построения системы «гидроакустическое вооружение – надводный корабль».** Приведенный анализ гидроакустических характеристик водных масс Мирового океана позволяет сделать ряд выводов, важных с точки зрения обоснования структуры построения комплексной системы «гидроакустическое вооружение – надводный корабль», адаптированной к потенциальным возможностям извлечения гидроакустической информации из морской среды. Они включают следующее.

**Во-первых,** гидрофизические поля Мирового океана, влияющие на распространение в нем звуковых волн, характеризуются большим числом физических факторов, обуславливающих пространственную и временную изменчивость этих полей. Обобщенной характеристикой водных масс океана, наиболее полно описывающей акустические свойства морской среды, является комплексное поле скорости звука, содержащее детерминированную и случайную составляющие.

**Во-вторых**, детерминированная составляющая изменчивости поля скорости звука в морской среде наиболее четко выражена по вертикальному распределению (вертикальному градиенту), поскольку горизонтальные градиенты на 2–3 порядка меньше вертикальных градиентов. Именно различие характеров вертикального разреза скорости звука определяет наиболее важные особенности распределения параметров акустического поля в локальных районах Мирового океана. Эти особенности, часто именуемые «гидроакустическими явлениями» [1], включают возникновение: зон акустической освещенности и зон акустической тени; слоя скачка звука; приповерхностного и подводного звукового каналов; дальних зон акустической освещенности и донной подсветки.

**В-третьих**, характер и области проявления указанных выше гидроакустических явлений в значительной мере определяются условиями заглубления источников и приемников звука в привязке к вертикальному распределению скорости звука. При этом важными факторами возможностей практического использования этих явлений являются глубина, протяженность по глубине и по дальности областей существования описанных явлений. Именно эти факторы определяют эффективность использования параметров гидроакустических явлений при практическом решении задачи поиска подводных объектов.

Приведенный качественный анализ характера распределения энергии акустических полей при различных гидроакустических явлениях, возникающих в морской среде Мирового океана, позволяет утверждать о том, что в потенциальном плане в морской среде существует полная информация о наличии и свойствах имеющихся там подводных объектов и объектов, расположенных на поверхности моря. Однако особенность этой информации состоит в том, что, в зависимости от состояния гидрофизических полей интересующей нас зоны Мирового океана, эта информация может быть сосредоточена по глубине на различных морских горизонтах. Поэтому для эффективного отбора ее из морской среды соответствующие гидроакустические средства должны иметь возможность изменять в требуемых пределах глубину погружения. Этот вывод имеет принципиальный характер при выборе путей построения комплексной системы «гидроакустическое вооружение – надводный корабль». Он заключается в том, что с учетом над-

водного корабля как носителя гидроакустических средств различного назначения эти средства должны быть реализованы в виде двух составляющих. Первая из них должна иметь устройства излучения и приема звука собственно на корпусе корабля, что представляется наиболее естественным при построении системы «гидроакустическое вооружение – надводный корабль». Вторая составляющая должна включать устройства излучения и приема, глубину погружения которых можно варьировать, чтобы обеспечить эффективное использование параметров используемых при этом гидроакустических явлений.

Таким образом, образование комплексной системы «гидроакустическое вооружение – надводный корабль» из ГАС, излучающие и приемные антенны которых размещены на корпусе надводного корабля, и из ГАС, в состав которых входят гидроакустические антенны переменной глубины, имеет своим обоснованием научные основы формирования акустических полей в морских средах с учетом параметров их гидрофизических полей.

При этом использование в составе системы «гидроакустическое вооружение – надводный корабль» ее компонента в виде ГАС с гидроакустическими антеннами, стационарно размещенными на корпусе надводного корабля, обеспечивает эффективный поиск, обнаружение и сопровождение объектов на основе таких гидроакустических явлений, как приповерхностный звуковой канал, зоны акустической освещенности и акустической тени. В то же время, именно возможность появления зон тени при использовании этого компонента из-за отрицательной рефракции звуковых лучей во многих случаях ограничивает дальность действия системы «гидроакустическое вооружение – надводный корабль».

Описанный недостаток устраняется введением в состав системы «гидроакустическое вооружение – надводный корабль» второго ее компонента, а именно ГАС с антенной переменной глубины. Эти ГАС позволяют использовать при реализации поставленных перед системой «гидроакустическое вооружение – надводный корабль» задач такие гидроакустические явления, как слой скачка и работа под ним, подводный звуковой канал, дальние зоны акустической освещенности, донную подсветку и явления мелкого моря. Именно появление этого компонента существенно расширило возможности системы «гидроакустическое вооружение – надводный корабль»

по поиску, обнаружению и сопровождению подводных лодок и надводных кораблей, в том числе и за счет дальнего гидроакустического наблюдения, и обеспечило тем самым возможность практически полного извлечения системой «гидроакустическое вооружение – надводный корабль» информации, имеющейся в морской среде в заданных районах Мирового океана.

### Вывод

Морская среда содержит полный объем информации о наличии и свойствах объектов, находящихся в ней и на ее поверхности. При этом особенностью этой информации является то, что она может быть сосредоточена на различных морских горизонтах, глубина расположения которых определяется состоянием гидрофизических полей контролируемой зоны Мирового океана. Поэтому для полного отбора этой информации из морской среды гидроакустические средства должны иметь возможность располагать свои гидроакустические антенны по глубине на любом из морских горизонтов. Для гидроакустического вооружения надводного корабля это означает, что оно должно иметь два компонента: гидроакустические станции с антеннами, размещенными на корпусе корабля, и гидроакустические станции с антеннами переменной глубины.

### Список литературы

1. *Справочник по гидроакустике* / А.П. Евтюков, А.Е. Колесников и др. – Л.: Судостроение, 1988. – 552 с.
2. *Физика океана: в 2-х т.* – М.: Наука, 1978. – т. 1. – 456 с.
3. *Акустика океана: Современное состояние* / Под ред. Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1982. – 246 с.
4. *Акустика океана: Пер. с англ.* / Под ред. Дж. Де Санто. – М.: Мир, 1982. – 246 с.
5. *Бреховских Л.М. Теоретические основы акустики океана* / Л. М. Бреховских, Ю. П. Лысанов. – Л.: Гидрометиздат, 1982. – 320 с.
6. *Ветер и волны в океанах и морях: справочные данные* / И. Н. Давидан, Л. И. Лопотухин [и др.]. – Л.: Транспорт, 1974. – 264 с.
7. *Клей К. Акустическая океанография: Основы и применение: пер. с англ.* / К. Клей, Г. Медвин. – М.: Мир, 1980. – 580 с.
8. *Акустика дна океана: Пер. с англ.* – М.: Мир, 1984. – 454 с.
9. *Боголепов К.В. Геология дна океана* / К. В. Боголепов, Б. М. Чиков. – М.: Наука, 1976. – 247 с.
10. *Федоров К.Н. Тонкая термоклинная структура океана* / К. Н. Федоров. – Л.: Гидрометиздат, 1976. – 184 с.