

О ВЛИЯНИИ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ЗВУКА И ТЕЧЕНИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МОРЕ

А.А. Ярошенко, О.Р. Ластовенко, В.А. Лисютин, И.В. Калинюк
Севастопольский национальный технический университет
Студгородок, г. Севастополь, 99053, Украина
e-mail: Yaroshenko@optima.cjm.ua

Рассматриваются типовые профили скорости звука в море, характерные для прибрежной зоны и глубоководных районов. Уточняется классификация приповерхностных и глубинных подводных звуковых каналов, указывается на особенности и некоторые аномалии профилей скорости звука в Черном море. Обращается внимание, что течение формирует условия для волноводного распространения звука.

ВВЕДЕНИЕ

Скорость звука является одной из важнейших акустических характеристик морской среды. Основными величинами, от которых зависит скорость распространения звука в море, являются температура (T), солёность (S) и гидростатическое давление (P). Величина скорости звука может быть определена путём непосредственных измерений с помощью специальных приборов - скоростемеров либо вычислением по эмпирическим формулам [1-3], представляющим собой зависимости вида

$$c = c_0 + \Delta c(T) + \Delta c(S) + \Delta c(P) + \Delta c(T, S, P),$$

где $c_0 = 1449,30$ м/с - опорное значение скорости звука при $T = 0^{\circ} \text{C}$, $S = 35\text{‰}$ и $P = 9,806$ Па, а остальные члены - поправки-приращения, учитывающие раздельное и совместное влияние различных факторов. Обычно от поправки по давлению $\Delta c(P)$ переходят к поправке по глубине $\Delta c(z)$.

Среднее значение величины скорости звука в Мировом океане принято равным 1500 м/с, а возможный диапазон изменения 1400 - 1600 м/с. Диапазон пространственной изменчивости соответствует размерам водоёма, временной - от кратковременных синоптических до сезонных годовых колебаний. Наибольшая изменчивость наблюдается в приповерхностном деятельном слое вод с глубинами до 100 - 200 м [3].

Для решения задач о распространении звука важно не абсолютное значение скорости звука, а зависимость скорости от глубины $c(z)$ - профиль скорости звука. При различных типах вертикального распределения скорости звука возникают гидроакустические явления, оказывающие благоприятное либо неблагоприятное воздействие на дальность его распространения.

Крупномасштабная вертикальная структура вод глубокого моря, определяющая вид профиля скорости, имеет несколько характерных участков различной протяжённости. Непосредственно у поверхности расположен слой, подверженный прямому воздействию всех метеофакторов. Под приповерхностным слоем находится сезонный термоклин, или слой температурного скачка, в котором температура резко уменьшается с глубиной. Летом и осенью в тихую погоду сезонный термоклин устойчив и имеет чёткие границы. Зимой и весной, а также в Арктике он сливается с поверхностным слоем и выделить его невозможно. Под сезонным находится протяженный по глубине основной термоклин, подверженный незначительным сезонным изменениям. В

основном термоклине наблюдается наибольшее изменение температуры воды. Ниже основного термоклина до дна простирается глубоководный изотермический слой, имеющий почти постоянную температуру.

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В МОРЕ

Отклонения скорости звука от опорного значения могут быть обусловлены приращениями термической, халинной (соленостной) и гидростатической составляющих

$$\Delta c = \left(\frac{\partial c}{\partial T}\right)_{SP} \Delta T + \left(\frac{\partial c}{\partial S}\right)_{TP} \Delta S + \left(\frac{\partial c}{\partial z}\right)_{TS} \Delta z .$$

Влияние изменений температуры на скорость звука максимально при низкой температуре воды. Гидростатический градиент скорости звука $|\Delta c(z)/\Delta z|$ нелинейно возрастает при увеличении глубины [1,3].

Выделяют следующие важнейшие элементы вертикальной стратификации скорости звука в океане. Зоны со знакопостоянной положительной или отрицательной рефракцией, слои температурного скачка с большим значением вертикального градиента скорости, звуковые каналы и антиканалы. Звуковые каналы концентрируют акустическую энергию и идентифицируются минимумами на профиле скорости звука или образуются за счет течений [4]. Антиканалы формируются в окрестностях локальных максимумов профиля скорости или за счет противотечений.

Монотонные профили скорости звука. В верхних слоях океана, пока влияние гидростатического давления мало, а температурные градиенты значительны, вертикальное распределение скорости звука приблизительно повторяет вертикальное распределение температуры с небольшими отклонениями за счёт солёности - на рисунке 1а,б представлены профили скорости и температуры прибрежной части Черного моря. На рисунке 1б очевиден слой температурного скачка и соответствующий ему по глубине участок с наибольшим градиентом скорости.

Практически неизменная скорость звука по всей глубине представлена на рисунке 1а [1,5]. Этот тип распределения характерен для мелководных районов, когда гидростатическое давление не оказывает существенного влияния на скорость звука. В ветреную погоду в осеннее и зимнее время года в результате интенсивного охлаждения поверхности моря более холодная и, следовательно, более плотная вода с поверхности опускается вниз, а тёплая вода нижних слоёв поднимается вверх. Происходит конвективная вертикальная циркуляция воды, выравнивающая её температуру и солёность по всей глубине.

Отрицательную рефракцию - убывание скорости звука с глубиной - иллюстрирует рисунок 1а [1,5]. Данный профиль скорости звука чаще всего устанавливается в мелководных прибрежных районах морей при наличии волнения и интенсивном прогревании приповерхностных слоёв. Это неблагоприятный случай для распространения звука. Звуковые лучи вследствие рефракции отклоняются вниз, в направлении дна. Около поверхности возникает зона геометрической тени. Внутри зоны тени в результате дифракции волн, рассеяния на случайных неоднородностях среды и отражений от дна тем не менее обнаруживается ослабленное звуковое поле.

Профиль скорости звука, представленный на рисунке 1б, характерен для мелкого моря и океанического шельфа в летний период и тихую погоду, когда температура верхнего слоя воды существенно выше. Теплопроводность воды невелика, поэтому интенсивно прогревается

только приповерхностный слой. Наблюдается резкое изменение скорости звука в тонком слое, называемом слоем температурного скачка. При таком профиле скорости звука наиболее неблагоприятные условия для гидроакустического зондирования дна или объектов, расположенных глубже слоя скачка. Переход звуковых волн через слой скачка сопровождается их значительным ослаблением вследствие отражения. Если же источник расположен глубже слоя скачка, то звуковые лучи заворачивают в направлении дна, что приводит к образованию зоны геометрической тени вблизи поверхности.

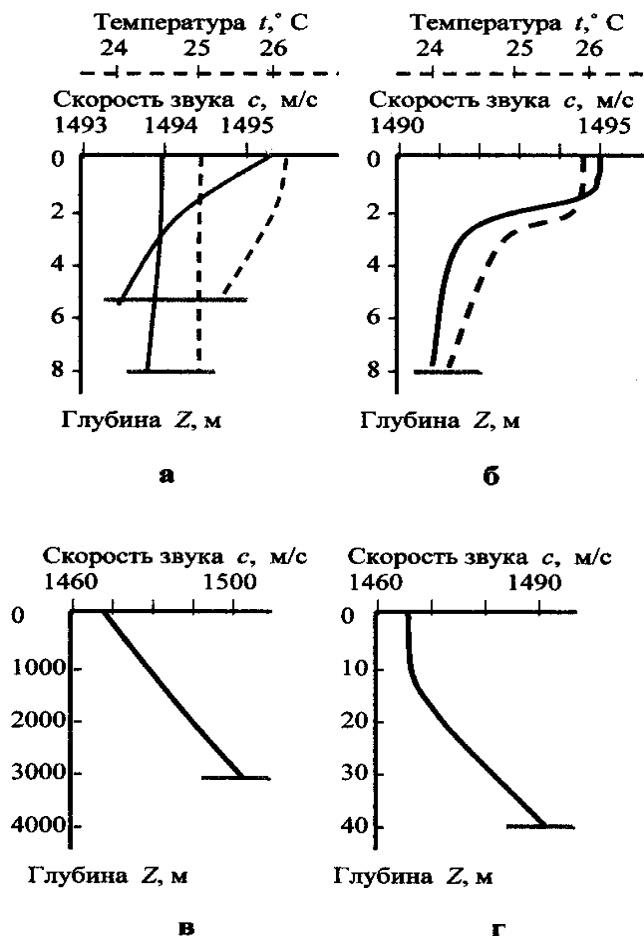


Рисунок 1 – Монотонные профили скорости звука

Положительная рефракция - возрастание скорости звука с глубиной – представлена на рисунке 1в [1,5]. Характерна для глубоководных арктических и антарктических районов океана, а также мелководных морей в осеннее - зимнее время. В глубоком море возрастание скорости звука обусловлено ростом гидростатического давления, а в мелком - ростом температуры воды с глубиной при интенсивном тепловыделении с поверхности. Направление распространения звуковых лучей всегда отклоняется в сторону уменьшения величины скорости звука, в данном случае - к поверхности. При таком типе профиля скорости звука дальность его распространения большая по сравнению с дальностью при постоянном профиле за счет отсутствия поглощения звука дном, и возможно образование приповерхностного звукового канала [6].

Существует разновидность вертикального распределения, когда в приповерхностном слое некоторой толщины устанавливается неизменная скорость звука, а ниже этого слоя скорость звука растёт – рисунок 1г [5]. Такой профиль наблюдается, когда тёплая вода в глубине моря обладает большей солёностью, чем вода приповерхностных слоёв, распределённая стоком рек или интенсивным ливнем. Конвекция в глубоких слоях отсутствует, поскольку малы вертикальные градиенты плотности воды.

Немонотонные профили скорости звука. Звуковые каналы. Особый интерес представляют случаи, когда профиль скорости звука на некоторой глубине имеет минимум. При этом образуются звуковые каналы, что создаёт благоприятные условия для распространения звука на значительные расстояния. В основу классификации профилей $c(z)$ положено количество и вид акустических волноводов, обусловленных крупномасштабной вертикальной термохалинной структурой вод.

Крупномасштабно и океанологически звуковые каналы подразделяют на приповерхностные и подводные (глубинные), энергетически - по способности к концентрации акустической энергии на «сильные», с большим градиентом скорости и «слабые», с относительно малым градиентом [1,5]. Физическая классификация соответствует фактору среды, вызвавшему формирование канала.

Глубина, соответствующая минимальному значению скорости звука, называется осью подводного звукового канала. Сила акустического волновода количественно характеризуется критическим - максимальным углом выхода звуковых лучей из точечного источника, захватываемых каналом [1]. Критический угол определяется по соотношению

$$\chi = \sqrt{\frac{2\Delta c}{c_0}},$$

где Δc – приращение скорости звука между осью (поверхностью океана) и границей волновода (подповерхностный максимум скорости звука); c_0 – скорость звука на оси канала.

Приповерхностные звуковые каналы (далее ППЗК) физически классифицируют по причинам возникновения на гидростатические, термические, халинные и синоптические [5,6,7]. Ширина ППЗК – это расстояние от поверхности океана до глубины подповерхностного максимума скорости звука. Соответствующие профили скорости звука изображены на рисунке 2а.

Гидростатический ППЗК [6,7,8]. Профиль скорости звука - рисунок 2а, кривая I. Формируется вследствие роста давления в водах с однородным по температуре и солёности слоем. Вертикальный градиент скорости - порядка $0,017 \text{ с}^{-1}$, типичная ширина в приэкваториальных областях - от 10-20 м до 50-100 м, критический угол небольшой и не превышает $1-2^\circ$. Сезонные вариации параметров выражены слабо. В умеренных и приполярных широтах канал более мощный, с шириной около 1000м. В субполярных широтах в зимнее время канал расширяется до дна - профиль, соответствующий рис.1в. Критический угол составляет $6-15^\circ$.

Халинный ППЗК [6]. Профиль скорости звука – рисунок 2а, кривая II. Формируется в водах с сильно опресненным верхним слоем. Относительное влияние температуры и давления невелико. Резкое увеличение солёности с глубиной при однородном поле температуры верхнего слоя воды (5-70м) обуславливает в нем большой положительный градиент скорости звука $0,1-1,5 \text{ с}^{-1}$. В районах, подверженных интенсивному распреснению, формируется сильный волновод, способный концентрировать значительную часть энергии источников звука, оказавшихся в пределах его границ. За счет большого вертикального

градиента скорости каналовые лучи халинного волновода имеют значительно меньшую длину цикла по сравнению с лучами гидростатического ППЗК. Критический угол в зависимости от опреснения находится в пределах $2-12^\circ$. Благодаря мощной плотностной стратификации халинный канал гораздо более устойчив во времени по сравнению с гидростатическим. Халинные ППЗК распространены в областях, примыкающих к устьям крупных полноводных рек.

Термический ППЗК [1,5,6,8]. Профиль скорости звука для этого случая представлен на рисунке 2а, кривая III. В поверхностных водах, где верхний однородный по температуре и солености слой подстигается инверсией температуры, формируется большой градиент скорости звука порядка $1-3 \text{ с}^{-1}$. Возникает довольно «сильный» ППЗК с критическим углом от 4 до $9-10^\circ$, но небольшой - $10-30$ м ширины. К термическому типу относится подповерхностный канал, существующий в теплое полугодие в Субполярных зонах полушарий. Этот относительно узкий волновод был назван «антарктической (арктической) трубой». Профиль скорости звука показан на рисунке 2б, кривая II.

Синоптический ППЗК [7]. Профиль скорости звука представлен на рисунке 2а, кривая IV. Вызывается суточными колебаниями температуры либо интенсивными ливневыми осадками при тихой погоде (волнение не более 2 баллов). Вертикальные градиенты скорости звука в синоптических суточных волноводах невелики, порядка $0,08-0,35 \text{ с}^{-1}$, ширина волновода $5-10$ м. Непосредственно после выпадения ливневого дождя на поверхности моря образуется прослойка холодной распресненной воды толщиной $0,2-0,3$ м. В течение последующих $5-20$ минут ее толщина увеличивается до $1-2$ м. Образуется ППЗК, в котором скорость звука у поверхности на $10-25$ м/с меньше фона. Уменьшение скорости звука обусловлено совместным влиянием термической и халинной составляющих. Градиент скорости на глубине $0,3-1,2$ м достигает $25-60 \text{ с}^{-1}$. С течением времени ширина ППЗК продолжает увеличиваться, градиент скорости уменьшается. Теперь он обусловлен в основном термической составляющей. Через $30-80$ минут после ливневого дождя на глубине $0,7-1,5$ м регистрируется четко выраженный минимум скорости звука. Постепенно минимум скорости и нижняя граница узкого волновода смещаются вниз, скорость звука у поверхности увеличивается до значения, близкого к фоновому – образуется верхняя граница волновода, он «отрывается» от поверхности. Сформированный узкий волновод занимает слой $6-10$ м. Возникновение синоптического ППЗК увеличивает дальность обнаружения надводных объектов в $1,5-3$ раза.

Подводный (глубинный) звуковой канал (далее ПЗК). Профиль скорости звука представлен на рисунке 2б, кривая I. Согласно [1,5,6] классическим типом глубинного звукового волновода является канал, наблюдаемый в умеренной - тропической зонах полушарий. Минимум скорости звука на глубинах порядка $1000-2000$ м формируется «сверху» в результате уменьшения температуры с глубиной в хорошо стратифицированных подповерхностных и промежуточных водах. Ниже оси канала скорость звука увеличивается в результате роста давления. Такой тип канала получил название гидростатического. Ширина канала $2000-3000$ м, критический угол $8-16^\circ$. Более или менее выраженный минимум скорости звука наблюдается почти во всех морях. Глубина оси подводного звукового канала в океане обычно составляет $1000-1200$ м. В тропической зоне она опускается до 2000 м, а в умеренных широтах устанавливается ближе к поверхности. В Центральной Атлантике глубина оси канала меняется в пределах $800-1200$ м.

Разделяют два вида классического глубинного ПЗК, соответствующие двум различным соотношениям между скоростями звука на верхней границе канала и у дна океана на глубине $z=H$ [5,6]. ПЗК, для которого

$c(0) < c(H)$, называют каналом первого вида. Нижняя граница канала в этом случае не достигает дна. В канале второго вида $c(0) > c(H)$, и нижней его границей является дно. Эти соотношения определяют ширину гидростатического канала, верхняя и нижняя границы которого связаны равенством скорости звука.

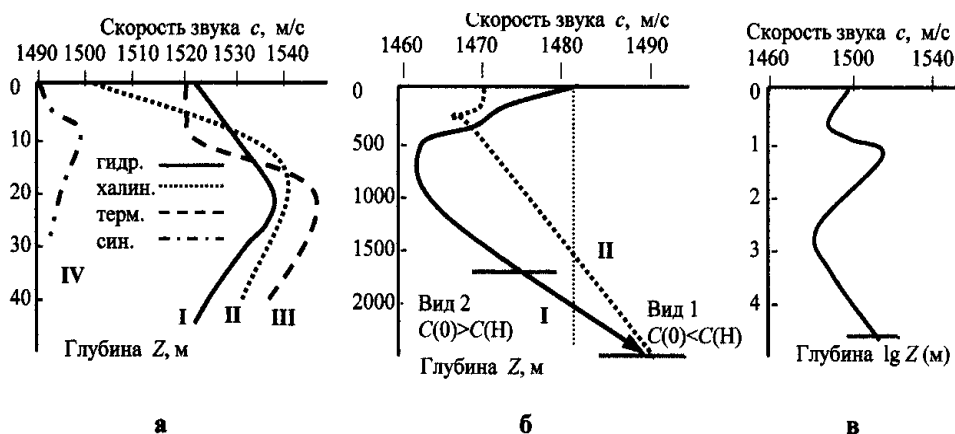


Рисунок 2 – Немонотонные профили скорости звука

Для глубоководных районов волноводное распространение в случае профиля рисунка 2б, кривая I будет наблюдаться в области от $z=0$ до глубины, где $c(z)=c(0)$. Соответствующие горизонталы являются границами подводного звукового канала.

Для менее глубоководных районов дно океана расположено выше, и подводный звуковой канал простирается от дна до глубины z , на которой скорость звука равна $c(H)$. Выше этой горизонтали звуковые лучи не проникают.

Условия распространения звука в этих каналах существенно различны. В ПЗК первого вида условия дальней проводимости более благоприятны, т.к. звуковые лучи не касаются дна, при отражении от которого поглощается часть акустической энергии. Другое важное отличие между видами классического ПЗК связано с тем, что при одном и том же знаке приращения скорости звука вблизи верхней границы волновода изменение ширины канала происходит по-разному. Из рисунка 2б очевидно, что увеличение скорости звука около верхней границы канала приводит к расширению ПЗК первого вида и сужению ПЗК второго вида.

Двухосевой звуковой канал. Иногда в океане образуется не один, а два подводных звуковых канала – рисунок 2в [6]. Профиль скорости звука имеет два минимума, расположенных на существенно различных глубинах. Более мелкорасположенный является приповерхностным каналом термического типа, образованным за счёт наличия ниже своей оси более тёплой и (или) более солёной воды. Более глубокий канал – гидростатического типа, возникает за счёт роста давления.

Особенности Черноморского подводного звукового канала.

Подводный звуковой канал в Черном море существенно отличается от океанского. Его ширина на порядок меньше, а ось располагается не в глубинных слоях, а в деятельном слое [7].

В Черном море ПЗК образуется вследствие увеличения скорости звука в приповерхностном слое и образования минимума на глубине 60-100 м. В верхней части ПЗК в течение года температура изменяется на

24° - от 2°С зимой до 26°С летом, соленость - на 5‰. Изменение температуры верхнего слоя Черноморских вод вызывает приращение скорости звука на 79 м/с, изменение солености - на 6,7 м/с, изменение гидростатического давления - на 1,55 м/с. Нижняя часть канала практически не изменяется в течение года, рост скорости звука происходит за счет увеличения гидростатического давления. Образование и исчезновение ПЗК в Черном море обусловлено исключительно формированием и трансформацией верхней части ПЗК. Следовательно, по причине происхождения Черноморский ПЗК является термическим. Типичные профили скорости звука показаны на рисунке 3а.

Зимой подводный звуковой канал выражен слабо. Перепад скорости звука не превышает 3-5 м/с, наибольшая ширина ПЗК 200-330 м. Ось располагается на глубине 30-100 м. Величины градиентов скорости не превышают 0,05 с⁻¹. Весной и летом по мере прогрева воды ось канала смещается вверх до глубин 50-65 м, ширина канала достигает 1500 м. Значения градиентов скорости в интервале глубин от 20 до 30 м равны 2,2 - 3,5 с⁻¹. Здесь образуется ярко выраженный слой скачка скорости звука. В летний период сила ПЗК максимальна, критический угол достигает 13 - 16°. Осенью перепад скорости звука заметно меньше весенне-летнего и составляет 10-18 м/с. Ось ПЗК может располагаться в диапазоне глубин от 60 до 110 м, при этом наибольшая ширина канала не превышает 450-550 м. Критический угол в осенний период уменьшается до 6,5-7,5° [7].

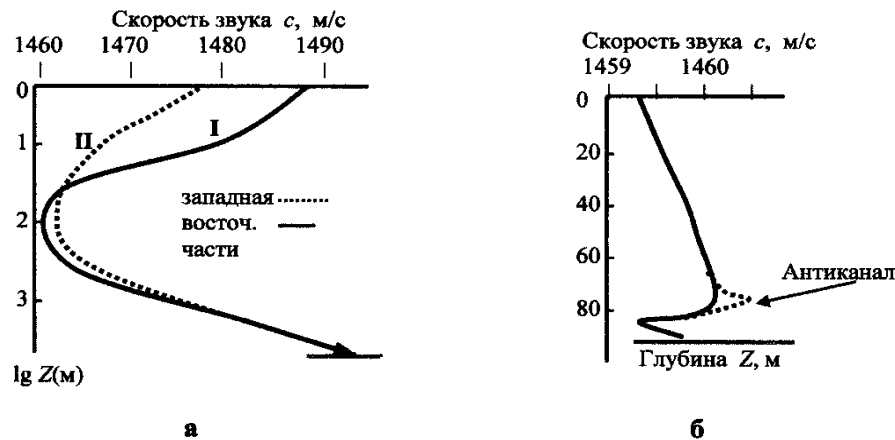


Рисунок 3 - Профили скорости звука Черного моря

Об аномалиях вертикального распределения скорости звука волноводного типа в Черном море. Аномальными следует считать нестационарные профили скорости звука, формирующиеся эпизодически только в определенных районах морей.

Стратификационные неоднородности, искажающие сглаженный, «фоновый» профиль скорости звука, в конечном итоге можно свести к двум: волноводного и антиволноводного типа. Обычно наличие узковолноводной аномалии сопровождается также и прилегающей к ней антиволноводной. Об узком волноводе принято говорить, когда величина скорости звука значительно, на 5-20 м/с, отличается от фона. Значения же экстремумов скорости звука в антиволноводных аномалиях редко превышают фон более чем на 3-5 м/с. Причинами, вызывающими формирование аномалий профиля скорости звука, могут являться нестационарные инверсионные и ступенчатые термохалинные образования, а также глубинные течения, вызывающие постоянный

горизонтальный массоперенос вод с отличной от выше- и нижерасположенных слоев температурой и соленостью. В подповерхностных водах под влиянием неоднородностей происходит расслоение основного акустического волновода на локальные каналы и антиканалы. Характерный вертикальный масштаб микроволноводов порядка 10-100 м, а их критический угол 1-3°. Глубже оси основного канала профиль скорости звука гораздо менее возмущен [7, 9-11].

Трансформация с течением времени синоптического волновода, вызванного ливневым дождем, непременно сопровождается появлением сопутствующей антиволноводной аномалии шириной 1,5-2 м, положительный экстремум скорости звука которой отличается от фонового значения на 1,0-1,5 м/с и дальнейшим постепенным переформированием волновода в антиволновод, завершающимся через 14-28 часов после ливня на горизонте 75-80 м. Синоптический антиволновод через 8-29 часов прекращает существование, сливаясь с фоном [7, 9-11].

Постоянные течения в шельфовых районах Черного моря поднимают илистые и другие взвеси с морского дна в слое шириной 5-15 м, что вызывает уменьшение скорости звука на 1,5-4 м/с [7,12]. По этой причине в придонных слоях шельфовых районов образуются узковолноводные аномальные области шириной 5-15 м. Экстремум скорости звука располагается в 2-5 м от дна. Характерные профили скорости представлены на рисунке 3 б. Узковолноводные аномалии достаточно устойчиво регистрируются в районах с глубиной 80-100 м. В районах с большими или меньшими глубинами контрастность узких волноводов уменьшается до полного исчезновения, вероятно, вследствие ослабления течений (ниже) и ветрового перемешивания штормами (выше).

Зимой в районах с преимущественно песчаным дном контрастность узкого волновода подчеркивает антиволновод, располагающийся в 10-15 м от дна. Его ширина достигает 5-10 м, а экстремум скорости звука на 0,5-1,5 м/с превышает фон. Профиль с антиволноводом показан на рис.3б пунктирной линией. Появление этих антиволноводных областей вызвано инверсией температуры в придонном слое на 0,1-0,8°С [7,12].

Следует отметить, что наличие морского течения уже создает условия для канализации акустической энергии, причем условия распространения звука по и против течения могут существенно различаться [4,13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Волноводные условия распространения акустических волн в Черном море могут формироваться не только в окрестности горизонтов с минимумом на профиле скорости звука.

Следует различать волновод и аномалию волноводного типа, принимая во внимание их различную способность к концентрации акустической энергии. Несмотря на то, что величины вертикальных градиентов скорости в аномалиях значительно меньше, чем в волноводах, их наличие способно существенно изменить картину звукового поля.

Волноводные аномалии, порожденные течениями, не изменяют профили скорости звука и температуры, не обнаруживаются скоростемерами, однако их суперпозиция с аномалиями волноводного типа иной природы в зависимости от взаимной ориентации скорости течения и направления распространения звука имеет «векторный» характер.

Существующую в настоящее время классификацию звуковых каналов по физическим причинам их возникновения следует уточнить, дополнив каналом, образованным морским течением.

SUMMARY

ABOUT THE INFLUENCE OF VELOCITY PROFILE OF SOUND AND CURRENTS ON THE PROPAGATION OF ACOUSTIC WAVES IN THE SEA

A. Yaroshenko, O. Lastovenko, V. Lisiutin, I. Kaliniuk

Sevastopol National Technical University

e-mail: Yaroshenko@optima.cjm.ua

The typical profiles of vertical sound velocity distribution in the ocean which is representative for coastal zone and deep-water areas is considered. The classification of surface and deep-water sound channel is specified, the particularities and some anomalies of sound velocity profile in the Black sea is pointed. It is pointed that the current is create the conditions for wave-guide sound propagation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустика океана / Под ред. Л.М. Бреховских.- М.: Наука, 1974.-693 с.
2. Бабий В.И. Групповые измерения скорости звука в морской среде // Мор. гидрофиз. журн. - 2003. - № 1. - С. 67-71.
3. Евтютов А.П., Колесников А.Е., Корепин Е.А. и др. Справочник по гидроакустике. - Л.: Судостроение, 1988. - 552 с.
4. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. – М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры., 1989.- 416с.
5. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. - Л.: Гидрометеоздат, 1982. - 264 с.
6. Булгаков Н.П., Ломакин П.Д. Поле скорости звука и элементы его стратификации в Атлантическом океане. – Севастополь: НАН Украины; Мор. гидрофиз. институт, 1997. - 272 с.
7. Дивизинюк М.М. Акустические поля Черного моря. – Севастополь: НИЦ «Государственный океанариум» МО Украины и НАН Украины, 1998. - 351 с.
8. Бреховских Л.М., Гаврилов А.Н., Гончаров В.В., Писарев С.В., Чепурин Ю.А., Михалевский П.Н. Результаты эксперимента АСОУС // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. - 2002. - Т. 38, №6. - С. 726 - 737.
9. Богусевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. Особенности влияния нижней границы волновода на угловую структуру звукового поля в шельфовых районах Северо-Западной части Черного моря // Мор. гидрофиз. журн. - 2003. - № 5. - С. 40-46.
10. Богусевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. Возможности дальней акустической связи в ПЗК глубоководных районов Черного моря в условиях пространственной и сезонной изменчивости профилей скорости звука //Акустичний симпозіум “Консонанс-2005”. Збірник праць. – Київ: Інститут гідромеханіки НАН України, 2005. -С.78-83.
11. Богусевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. Дальнее распространение звука в приповерхностном подводном звуковом канале северо-западной части Черного моря //Акустичний симпозіум “Консонанс - 2005”. Збірник праць. – Київ: Інститут гідромеханіки НАН України, 2005. - С.84-89.
12. Дивизинюк М.М. Изменение акустических характеристик шельфовых районов Черного моря постоянными течениями // Акустичний вісник.-1999.-Т.2, № 3.- С.42-48
13. Голод О.С., Гончар Ю.А., Гончар А.И. Определение условий волноводного распространения звука // Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана: Сб. докладов 1-й Междунар. науч. конф. НАН Украины. Научно-технический центр панорамных акустических систем.- Запорожье, 2003. -С.64-76.

Ярошенко А.А., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики СевНТУ, г. Севастополь;

Ластовенко О.Р., ассистент кафедры высшей математики СевНТУ, г. Севастополь;

Лисютин В.А., ассистент кафедры высшей математики СевНТУ, г. Севастополь;

Калинюк И.В., аспирант кафедры высшей математики СевНТУ, г. Севастополь

Поступила в редакцию 6 апреля 2007 г.