

УДК 534.231

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА НА ВОЛНОВОДНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ

В. А. Лисютин, асс., А.А. Ярошенко, канд. физ.- мат. наук, доц.

Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь, Украина

Рассматриваются типовые профили вертикального распределения скорости звука в океане, характерные для прибрежной зоны и глубоководных районов. Анализируется классификация приповерхностных и глубинных подводных звуковых каналов, указывается на особенности и некоторые аномалии профиля скорости звука в Черном море.

ВВЕДЕНИЕ

Скорость звука является одной из важнейших акустических характеристик морской среды. Основными величинами, от которых зависит скорость распространения звука в море являются температура, солёность и гидростатическое давление. Величина скорости звука может быть определена путём непосредственных измерений с помощью специальных приборов - скоростемеров, либо вычислением по эмпирическим формулам [1-4].

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 слое воды с глубинами до 100 - 200 м [3,4].

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 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 [5].

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ОКЕАНЕ

Выделяют следующие важнейшие элементы вертикальной стратификации скорости звука в океане. Зоны с положительной и отрицательной рефракцией, слои температурного скачка, звуковые каналы и антиканалы. Звуковые каналы идентифицируются минимумами на профиле скорости звука. Антиканалы - слои локальных максимумов профиля скорости.

Монотонные профили скорости звука

Наибольшее влияние на скорость звука оказывает температура, при её увеличении скорость звука возрастает [1,3,6]. 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 рис.1а,б представлены профили скорости прибрежной части Черного моря. На рис.1б очевиден слой температурного скачка и соответствующий ему участок с наибольшим градиентом скорости.

Практически неизменная скорость звука по всей глубине - рис. 1а [1,7]. Этот тип распределения наиболее 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.

Отрицательная рефракция - убывание скорости звука с глубиной - рис.1а [4,6,7]. Данный профиль скорости звука чаще всего устанавливается в мелководных прибрежных зонах морей при наличии волнения вследствие интенсивного прогревания приповерхностных слоёв. Неблагоприятный случай для распространения звука. Звуковые лучи вследствие рефракции отклоняются вниз, в направлении дна. Возникает зона геометрической тени. Внутри зоны тени в результате дифракции волн на границе зоны и рассеяния на случайных неоднородностях среды всё-таки обнаруживается слабое звуковое поле.

Профиль скорости звука на рис. 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 условия для его распространения в горизонтальном направлении наиболее неблагоприятны. Звуковые лучи заворачивают в направлении дна, что приводит к образованию зоны геометрической тени. Переход звуковых лучей через слой скачка сопровождается значительным ослаблением звукового давления вследствие отражения.

Положительная рефракция - возрастание скорости звука с глубиной - рис.1в [6,7]. Характерно 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 данном типе профиля скорости звука дальность его распространения большая по сравнению с дальностью при равномерном профиле. Возможно образование приповерхностного звукового канала [7,8].

Существует разновидность вертикального распределения, когда в приповерхностном слое некоторой толщины устанавливается неизменная скорость звука, а ниже этого слоя скорость звука растёт - рис.1 г [6,7]. 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 вода в них более тяжёлая.

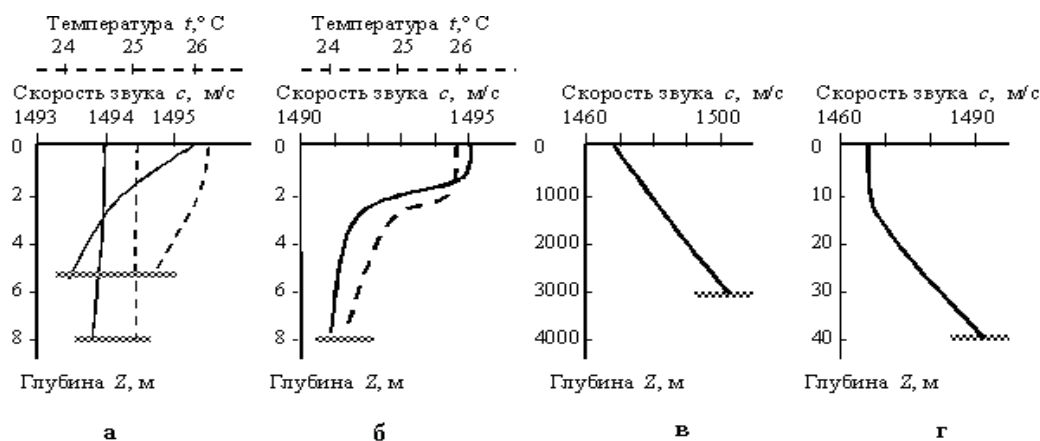


Рис. 1

Немонотонные профили скорости звука. Звуковые каналы

Особый интерес представляют случаи, когда скорость звука на некоторой глубине имеет минимальное значение. При этом образуются звуковые каналы, что создаёт благоприятные условия для распространения звука на значительные расстояния. Глубина, соответствующая минимальному значению скорости звука называется осью подводного звукового канала. Крупномасштабно звуковые каналы подразделяют на приповерхностные и подводные (глубинные), по способности к концентрации акустической энергии на «сильные» - с высоким градиентом скорости и «слабые» - с относительно низким. Сила акустического волновода количественно характеризуется критическим - максимальным углом выхода звуковых лучей из точечного источника, захватываемых каналом [1].

Приповерхностные звуковые каналы (далее ППЗК) классифицируют по причинам возникновения на гидростатические, термические, халинные и синоптические [7,8,9]. Ширина ППЗК - расстояние от поверхности океана до глубины подповерхностного максимума скорости звука. Соответствующие профили скорости звука изображены на рис.2а.

Гидростатический ППЗК [1,7,8,10]. Профиль скорости звука - рис.2а, кривая I. Формируется вследствие роста давления в водах с квазиоднородным по температуре и солёности слоем. Вертикальный градиент скорости - порядка 0.017 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 $6-15^\circ$.

Халинный ППЗК [8]. Профиль скорости звука - рис.2а, кривая II. Формируется в структурах с сильно опресненным верхним слоем. Влияние температуры и давления невелико. Резкое увеличение солёности с глубиной при однородном поле температуры верхнего слоя воды (5-70м) обуславливает в нем высокий положительный градиент скорости звука $0.1-1.5 \text{ с}^{-1}$. За счет высокого вертикального градиента скорости каналовые лучи халинного волновода имеют значительно меньшую длину цикла по сравнению с лучами гидростатического ППЗК. Критический угол в зависимости от опреснения - 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 рек.

Термический ППЗК [1,7,8,11]. Профиль скорости звука - рис.2а, кривая III. В поверхностных водах, где верхний однородный по температуре и солености слой подстиляется инверсией температуры, формируется высокий градиент скорости звука порядка $1-3 \text{ с}^{-1}$. Возникает довольно «сильный» ППЗК с критическим углом от 4 до $9-10^\circ$, но небольшой - $10-30 \text{ м}$ ширины. К термическому типу относится подповерхностный канал, существующий в теплое полугодие в Субполярных зонах полушарий. Профиль скорости звука - рис.2б, кривая II. Этот относительно узкий волновод был назван «антарктической (арктической) трубой».

Синоптический ППЗК [10]. Профиль скорости звука - рис.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 $5-10 \text{ м}$. При ливне градиент скорости может достигать $1.5-2 \text{ с}^{-1}$. Возникновение синоптического ППЗК увеличивает дальность обнаружения надводных объектов в $1.5 \div 3$ раза.

Подводный (глубинный) звуковой канал (далее ПЗК). Профиль скорости звука - рис.2б, кривая I. Согласно [8,12] классическим типом глубинного звукового волновода является канал, наблюдаемый в Умеренной - Тропической зонах полушарий. Минимум скорости звука на глубинах порядка $1000-2000 \text{ м}$ формируется «сверху» в результате уменьшения температуры с глубиной в хорошо стратифицированных подповерхностных и промежуточных водах. Ниже оси канала скорость звука увеличивается в результате роста гидростатического давления. Такой тип канала получил название гидростатического. Ширина канала $2000-3000 \text{ м}$, 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 $1000-1200 \text{ м}$. 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 $800-1200 \text{ м}$.

Разделяют два вида классического глубинного ПЗК, соответствующие двум различным соотношениям скорости звука на верхней границе канала и у дна океана на глубине $z = H$ [7,8]. ПЗК, для которого $c(0) < c(H)$, называют каналом первого вида. Нижняя граница канала в этом случае не достаёт до 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.

Для глубоководных районов волноводное распространение в случае профиля рис.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 дальнейшей проводимости более благоприятны, т.к. при отражении от жидких границ энергетические потери меньше, чем при отражении от неровного дна, где поглощается часть акустической энергии.

Двухосевой звуковой канал. Иногда в океане образуется не один, а два подводных звуковых канала - рис.2в [13]. Профиль скорости звука имеет два минимума, расположенных на существенно различных глубинах. Более мелкий 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.

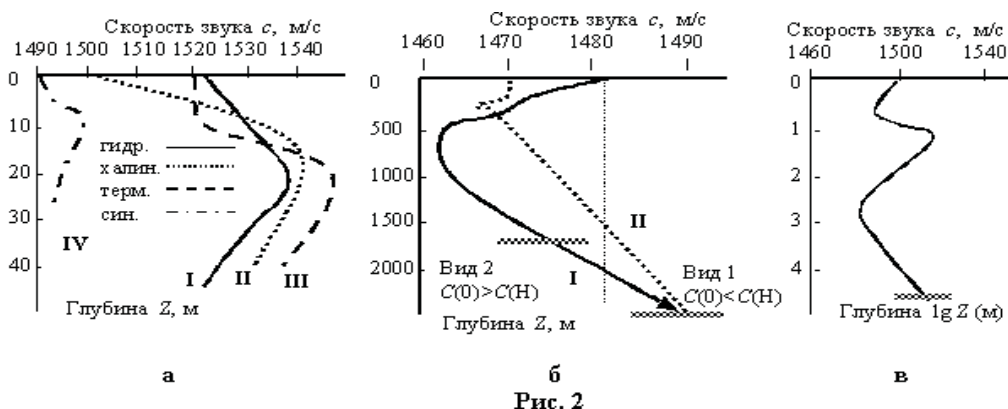


Рис. 2

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 вод [9].

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° зимой до 26° летом, соленость - на 5‰. 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 рис.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 $2.2 - 3.5 \text{ с}^{-1}$. Здесь образуется ярко выраженный слой скачка скорости звука. В летний период сила ПЗК максимальна, критический угол достигает $13 - 16^\circ$.

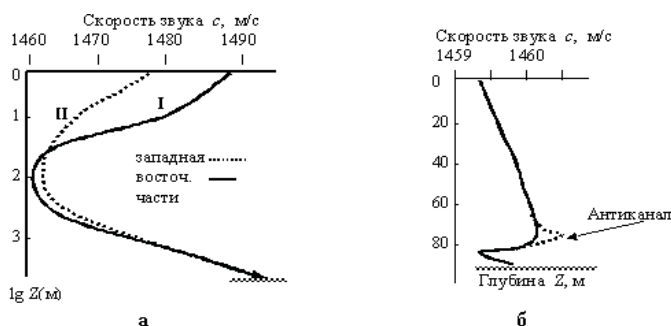


Рис. 3

Некоторые аномалии скорости звука в Черном море

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. 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 представлен на рис.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 [9]. Профиль с антиволноводом показан на рис.3 б пунктирной линией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акустические расчеты подходят к определенным пределам, накладываемым не столько аналитическими возможностями, сколько неопределенностями, присущими самой среде, непостоянной во времени и пространстве. Течения, приливы, волнение, турбулентности, внутренние волны и т.д. возмущают идеализированную усредненную картину среды. Как эксперимент, так и теория указывают на огромную роль скорости звука на результаты расчетов звуковых полей. Относительно малые возмущения профиля скорости могут полностью изменить характер звукового поля [12].

При проектировании и эксплуатации гидроакустических каналов передачи информации, особенно в мелком море, необходимо учитывать сезонные и суточные изменения профиля скорости и вероятность возникновения неблагоприятных акустических явлений.

ЛИТЕРАТУРА

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. *Справочник по гидроакустике* /А.П. Евтютов, А.Е. Колесников, Е.А. Корепин и др. - Л.: Судостроение, 1988. - 552 с.
4. *Физика океана* / Под ред. Ю.П. Доронина. - Л.: Гидрометеиздат, 1976. - 294 с.
5. *Урик Р.Дж.* Основы гидроакустики. - Л.: Судостроение, 1978. - 440 с.
6. *Клещев А.А., Клюкин И.И.* Основы гидроакустики.-Л.: Судостроение,1987.-224 с.
7. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. - Л.: Гидрометеиздат, 1982. - 264 с.
8. *Булгаков Н.П., Ломакин П.Д.* Поле скорости звука и элементы его стратификации в Атлантическом океане. НАН Украины, Мор.гидрофиз.инст.-Севастополь,1997.-272 с.
9. *Дивизинюк М.М.* Акустические поля Черного моря. - Севастополь: НИЦ «Государственный океанариум» МО Украины и НАН Украины. 1998. - 351 с.
10. *Буслаев В.С., Перель М.В.* Влияние вида профиля скорости вблизи поверхности на структуру акустического поля в глубоком море//Акуст.ж.-1986.-**32**, № 3.-с.296-302.
11. *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.
12. *Толстой И., Клей К.С.* Акустика океана. - М.: Мир, 1969. - 297 с.
13. *Физика океана. Гидродинамика океана. Т.2./* Под ред. В.М.Каменковича, А.С. Молина. - М.: Наука, 1978. - 456 с.