

Экспериментальные и экспедиционные исследования

УДК 534.2:551.462.32(262.5)

В.К. Богушевич, Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа

Особенности влияния нижней границы волновода на угловую структуру звукового поля в шельфовых районах северо-западной части Черного моря

Рассматривается возможность существования критических углов падения звуковой волны вдоль двух трасс распространения звука, являющихся типичными для северо-западного шельфа Черного моря с точки зрения характеристик нижней границы волновода и пространственно-временной структуры поля скорости звука. Нижняя граница волновода может проявлять свойство акустической прозрачности, как в случае приповерхностного звукового канала, так и в условиях отрицательной рефракции, если дно сложено илами мелкоалевритовыми, что является одной из причин значительных потерь при распространении звука. Углы полного внутреннего отражения существуют для дна, сложенного ракушечниками, при всех типичных для этого района гидрологических условиях, а в случае дна в виде илов мелкоалевритовых — при определенной вертикальной структуре поля скорости звука, что дает возможность использовать диапазон углов, при которых потерями при отражении звуковой волны от дна можно пренебречь.

Для решения практических задач создания мониторинга прибрежных вод возникает необходимость достижения наибольшей дальности распространения звука в шельфовых районах.

Дальность действия гидроакустических средств в мелководных районах Мирового океана весьма ограничена [1]. В частности, в условиях северо-западного шельфа Черного моря она ограничивалась десятками километров, а иногда составляла и менее 10 км [2]. Одной из причин, объясняющих такие значительные потери при распространении звука в этих районах, являются особенности характеристик нижней границы волновода и вертикальной структуры поля скорости звука в водном слое.

Оценим параметры нижней границы волновода и водной среды, а также некоторые особенности угловой структуры звукового поля с точки зрения лучевой акустики, которые наблюдаются при распространении звука частотой более 2,5 кГц вдоль двух трасс, одна из которых ориентирована относительно северной оконечности о. Тендра на м. Большой Фонтан, а другая — на юг. Эти две трассы характеризуются типичными для северо-западного шельфа донными отложениями и вертикальной структурой поля скорости звука морской среды.

Рассмотрим особенности нижней границы этого волновода. Как показывает анализ пространственной структуры осадочных отложений и их свойств, в качестве геоакустической модели дна северо-западного шельфа для рассматриваемого диапазона частот можно принять однослойную модель. Для трассы,

© В.К. Богушевич, Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа, 2003

соединяющей северную оконечность о. Тендра с м. Большой Фонтан, геоакустической моделью дна является слой илов мелкоалевритовых со скоростью продольных волн $c_1 = 1470 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и плотностью $\rho_1 = (1,38 \dots 1,63) \times 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

На второй трассе, направленной на юг от северной оконечности о. Тендра, геоакустическая модель дна представляет собой слой ракушечников со скоростью продольных волн $c_1 = 1500 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и плотностью $\rho_1 = (1,6 \dots 1,8) \times 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Поле скорости звука в горизонтальной плоскости в пределах достижимой дальности распространения звука в районе северо-западного шельфа Черного моря можно считать горизонтально-однородным. Верхнюю и нижнюю границы рассматриваемого волновода можно принять плоскопараллельными, глубину моря — равной 20 м. Типичными для северо-западной части Черного моря являются условия приповерхностного звукового канала (ППЗК), которые наблюдаются с октября по март, а также частично — в сентябре, и условия отрицательной рефракции, которые наблюдаются с апреля по август, в некоторых случаях — в сентябре. В качестве обобщенной модели водной среды для рассматриваемого района Черного моря можно принять двухслойную либо однослойную модель с линейным изменением скорости звука с глубиной в пределах слоя. Модель водного слоя описывается следующими параметрами: скоростью звука на верхней границе волновода c_0 ; вертикальным градиентом скорости звука g_1 и g_2 соответственно в первом десятиметровом и втором десятиметровом слоях для двухслойной модели; средним градиентом скорости звука $g_{\text{ср}}$ в двадцатиметровом водном слое для однослойной модели.

В районе северо-западного шельфа Черного моря можно отметить некоторые особенности влияния нижней границы волновода на характеристики звукового поля, связанные с соотношением волновых сопротивлений материала дна и морской воды на границе раздела двух сред. Нижняя граница волновода, особенно в шельфовых районах, оказывает сложное влияние на распространение звука из-за многообразия физических процессов, которые наблюдаются при падении звуковой волны на границу раздела двух сред. Известно, что падение звуковой волны на границу раздела вода — дно может сопровождаться процессами отражения, рассеяния и другими эффектами, связанными с проникновением звуковой волны в дно [3].

Коэффициент отражения при падении сферической волны на границу раздела вода — дно определяется соотношением [4]

$$V = \frac{m \cos \vartheta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \vartheta}}{m \cos \vartheta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \vartheta}},$$

где ϑ — угол падения звуковой волны; $n = c/c_1$ — отношение величин скорости звука в воде c и дне c_1 ; $m = \rho_1/\rho$ — отношение величин плотности материала дна ρ_1 и воды ρ .

Следует отметить возможность существования условий прозрачности границы, когда коэффициент отражения обращается в нуль. Условию про-

зрачности границы соответствуют углы падения звуковой волны, удовлетворяющие следующему уравнению: $\vartheta_{\text{пр}} = \arcsin \sqrt{\frac{m^2 - n^2}{m^2 - 1}}$. Необходимым условием существования таких углов является условие $c > c_1$, т.е. скорость звука вблизи дна должна превышать скорость звука в материале дна.

Кроме того, представляет интерес возможность существования углов полного внутреннего отражения, которые удовлетворяют уравнению [4]: $\vartheta_0 = \arcsin n$. При всех углах падения звуковой волны, превышающих угол полного внутреннего отражения, коэффициент отражения равен единице. Необходимым условием существования углов полного внутреннего отражения является условие $c < c_1$, т.е. скорость звука в воде на границе раздела вододно должна быть меньше, чем в материале дна.

Практический интерес представляет тот факт, что дно, сложенное ракушечниками (как это наблюдается для трассы, направленной на юг от северной оконечности о. Тендра), в условиях положительной рефракции не проявляет свойства прозрачности. Илистое дно в присутствии ППЗК проявляет свойства прозрачности и полного отражения лишь в определенных случаях.

Углы полного внутреннего отражения звуковой волны от дна, представляющего собой слой ракушечников, в течение ноября и декабря составляют интервал $79^\circ 08' \dots 79^\circ 52'$ (параметры обобщенной двухслойной модели: $c_0 = 1457,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $g_1 = + (0,05 \dots 0,4) \text{ с}^{-1}$, $g_2 = + 1,5 \text{ с}^{-1}$). При более высоких величинах скорости звука на поверхности моря угол полного внутреннего отражения равен 78° (параметры обобщенной однослойной модели: $c_0 = 1460,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $g_{\text{ср}} = + 0,35 \text{ с}^{-1}$).

В этот же период диапазон углов падения звуковой волны на илистое дно, в пределах которого коэффициент отражения обращается в нуль, составляет $84^\circ 17' \dots 87^\circ 06'$ для обобщенной двухслойной модели. Однако в случае относительно больших значений скорости звука на верхней границе волновода в ноябре и декабре эффект прозрачности нижней границы не наблюдается, а угол полного внутреннего отражения для обобщенной однослойной модели составляет $86^\circ 30'$.

В течение января и февраля явление прозрачности нижней границы для модели дна в виде слоя илов мелкоалевритовых может наблюдаться или отсутствовать (параметры обобщенной двухслойной модели: $c_0 = 1437,7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $g_1 = + (0,05 \dots 1,1) \text{ с}^{-1}$, $g_2 = + (0,48 \dots 2,6) \text{ с}^{-1}$). Нижняя граница не является прозрачной во всем диапазоне градиентов скорости звука в верхнем слое при наименьших градиентах в нижнем слое, а также при наименьших градиентах в верхнем слое во всем диапазоне градиентов в нижнем. Для модели дна в виде слоя илов мелкоалевритовых углы падения звуковой волны, при которых граница становится прозрачной, составляют диапазон $79^\circ 00' \dots 84^\circ 53'$ ($g_1 = + (0,4 \dots 1,1) \text{ с}^{-1}$, $g_2 = + 2,6 \text{ с}^{-1}$).

Для дна, сложенного ракушечниками, в течение января и февраля углы полного внутреннего отражения всегда присутствуют и составляют $74^\circ 09' \dots 80^\circ 30'$.

В марте, который также характеризуется ППЗК, условия прозрачности нижней границы, сложенной илами мелкоалевритовыми, не наблюдаются. Для типичных гидрологических условий марта (параметры обобщенной двухслойной модели: $c_0 = 1433,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $g_1 = +0,3 \text{ с}^{-1}$, $g_2 = +0,6 \text{ с}^{-1}$) угол полного внутреннего отражения составляет для модели дна в виде слоя илов мелкоалевритовых $78^\circ 58'$, а в виде слоя ракушечников – $74^\circ 08'$.

В сентябре в отдельные периоды может наблюдаться ППЗК в верхнем десятиметровом слое ($c_0 = 1495,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $g_1 = + (0,45 \dots 1,2) \text{ с}^{-1}$, $g_2 = -2,2 \text{ с}^{-1}$). Модель дна в виде слоя ракушечников не проявляет свойства прозрачности, а углы полного внутреннего отражения составляют $80^\circ 14' \dots 82^\circ 06'$. Для модели дна в виде слоя илов граница становится прозрачной для углов падения звуковой волны из интервала $81^\circ 08' \dots 85^\circ 16'$; углы полного внутреннего отражения для илистого дна отсутствуют.

В октябре верхний десятиметровый слой также охвачен ППЗК (параметры обобщенной двухслойной модели: $c_0 = 1474,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $g_1 = +0,5 \text{ с}^{-1}$, $g_2 = - (0,075 \dots 0,55) \text{ с}^{-1}$). Углы полного внутреннего отражения для нижней границы волновода, описываемой моделью в виде слоя ракушечников, составляют диапазон $79^\circ 22' \dots 80^\circ 24'$. Однако для модели дна в виде слоя илов в течение октября нижняя граница становится прозрачной при углах падения звуковой волны $83^\circ 18' \dots 86^\circ 37'$.

Так же как и в присутствии ППЗК, при отрицательных градиентах скорости звука модель дна в виде слоя ракушечников не проявляет свойства прозрачности.

В апреле и мае нижняя граница волновода не является прозрачной при всех гидрологических условиях и рассматриваемых типах моделей дна. Для типичных гидрологических условий этого периода углы полного внутреннего отражения составляют $77^\circ 19' \dots 81^\circ 42'$ для илов и $72^\circ 57' \dots 75^\circ 52'$ для ракушечников (параметры обобщенной двухслойной модели: ($c_0 = 1461,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $g_1 = - (0,4 \dots 1,4) \text{ с}^{-1}$, $g_2 = - (0,55 \dots 1,6) \text{ с}^{-1}$).

В период с июня по август условие прозрачности нижней границы, описываемой моделью в виде слоя илов мелкоалевритовых, выполняется только в отдельных случаях — при наименьших по абсолютному значению градиентах скорости звука в верхнем и нижнем водных слоях (параметры обобщенной двухслойной модели: ($c_0 = 1507,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $g_1 = - (0,9 \dots 1,6) \text{ с}^{-1}$, $g_2 = - (2,15 \dots 3,1) \text{ с}^{-1}$). Углы, при которых илистое дно становится прозрачным, в этом случае лежат в диапазоне $84^\circ 07' \dots 85^\circ 40'$. При других гидрологических условиях ($g_1 = -0,9 \text{ с}^{-1}$, $g_2 = -3,1 \text{ с}^{-1}$; $g_1 = -1,6 \text{ с}^{-1}$, $g_2 = - (2,15 \dots 3,1) \text{ с}^{-1}$) существуют углы полного внутреннего отражения, как для илов, так и для ракушечников, которые составляют соответственно $83^\circ 29' \dots 88^\circ 31'$ и $76^\circ 49' \dots 79^\circ 57'$.

В сентябре при отрицательных градиентах скорости звука в обоих слоях ($c_0 = 1495,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $g_1 = -0,7 \text{ с}^{-1}$, $g_2 = -2,2 \text{ с}^{-1}$) наблюдаются условия полного отражения звуковой волны для обоих типов моделей дна. Углы падения зву-

ковой волны, при которых коэффициент отражения равен единице, составляют для илов $86^{\circ}11'$ и для ракушечников $77^{\circ}55'$.

Таким образом, следует отметить важную особенность условий распространения звука на северо-западном шельфе Черного моря: дно оказывает самое различное влияние на формирование звукового поля, поскольку оно создает условия, как для полной прозрачности границы, так и полного отражения в зависимости от типа дна, гидрологических условий и углов падения звуковой волны. Возможность существования нулевых значений коэффициента отражения при определенных углах падения звуковой волны может наблюдаться только для илов с июня по сентябрь и с ноября по февраль (при некоторых типичных для этих месяцев гидрологических условиях), в октябре — при всех типичных гидрологических условиях. И только в период с марта по май не существует таких углов падения звуковой волны, при которых граница становится прозрачной. Наоборот, с марта по май явление полного внутреннего отражения наблюдается для всех типичных гидрологических условий и обоих типов грунтов. А в остальные месяцы — лишь при определенных гидрологических условиях, когда выполняется условие $c < c_1$. То есть с июня по февраль в зависимости от условий, формирующих поле скорости звука в воде на северо-западном шельфе Черного моря, могут наблюдаться явления, оказывающие прямо противоположное влияние на энергетические характеристики звукового поля.

Наличие ППЗК обеспечивает самые благоприятные условия для распространения звука в мелководных районах северо-западной части Черного моря. В частности, рассмотрим ППЗК, наблюдавшийся осенью ($c_0 = 1457,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $g_1 = +0,35 \text{ с}^{-1}$, $g_2 = +1,5 \text{ с}^{-1}$). Оценка угловой структуры звукового поля показывает, что диапазон захваченных каналом лучей ограничивается углом скольжения $5^{\circ}27'$ для находящегося вблизи поверхности моря излучателя звука ($z_1 = 1 \text{ м}$) и $1^{\circ}15'$ для излучателя, находящегося вблизи дна ($z_1 = 19 \text{ м}$). На расстоянии 10 км число циклов лучей, захваченных каналом, составляет от 21 до 42 при $z_1 = 1 \text{ м}$ и 24 для $z_1 = 19 \text{ м}$. Все лучи, вышедшие из излучателя под углами скольжения, не входящими в диапазон канальных, будут испытывать отражения от дна, причем число отражений на расстоянии 10 км будет превышать десятки. В то же время угол полного внутреннего отражения для дна в виде слоя ракушечников составляет $79^{\circ}52'$, т.е. все лучи с углами скольжения в нижнем слое, меньшими $10^{\circ}08'$, испытывают полное внутреннее отражение. Для илистого дна существуют углы скольжения, при которых коэффициент отражения равен нулю, — $4^{\circ}14' \dots 5^{\circ}43'$, т.е. лучи с углами скольжения в нижнем слое из этого диапазона проникают в дно и являются потерянными для ППЗК. Лучи, отразившиеся от дна, в точку приема придут со значительными потерями, поскольку коэффициент отражения в диапазоне углов скольжения, для которых справедливо лучевое представление звукового поля, составляет для ракушечников $0,27 \dots 0,63$, а для илов $0,12 \dots 0,54$.

В условиях отрицательной рефракции следует ожидать, что расстояния, на которые распространяется звук, будут невелики. Зона ближней акустической освещенности может ограничиваться сотнями метров, за пределами ко-

торой распространение звука происходит за счет лучей, последовательно отражающихся от дна. На расстоянии 10 км в зависимости от угла скольжения луча на нижней границе число отражений превышает десятки и даже сотни. Существование углов полного внутреннего отражения несколько улучшает условия распространения. При углах скольжения, превышающих угол полного внутреннего отражения, коэффициент отражения от дна меньше единицы. Таким образом, потери увеличиваются при каждом отражении луча от нижней границы. Оценим угловую структуру звукового поля для условий отрицательной рефракции, наблюдавшихся летом ($c_0 = 1507,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $g_1 = -0,9 \text{ с}^{-1}$, $g_2 = -2,15 \text{ с}^{-1}$). Расчеты показывают, что интервал углов скольжения звуковых лучей, не претерпевающих отражений от верхней границы, для находящегося вблизи дна приемника звука составляет $3^\circ 15' \dots 11^\circ 33'$ ($z_1 = 19 \text{ м}$), а для приемника, расположенного у поверхности моря, $-11^\circ 25' \dots 11^\circ 33'$ ($z_1 = 1 \text{ м}$). Распространение звука в этих условиях сопровождается явлением полного прохождения лучей через нижнюю границу в дно, сложенное илами, если углы скольжения звуковых лучей в нижнем слое составляют $4^\circ 20' \dots 5^\circ 53'$. Углы прозрачности входят в интервал углов скольжения лучей, не отражающихся от верхней границы волновода, только для приемника, находящегося вблизи дна.

Таким образом, для достижения наибольшей дальности распространения звука в шельфовых районах северо-западной части Черного моря необходимо выбирать трассы распространения звука, исходя из типа осадочных отложений, слагающих дно. Трассы распространения звука, расположенные в районах северо-западного шельфа с илистым дном, характеризуются, как правило, неоднозначностью свойств нижней границы волновода с точки зрения отражательной способности. В течение одного и того же временного периода в зависимости от вертикальной структуры поля скорости звука может наблюдаться либо явление полного внутреннего отражения звуковой волны, либо эффект прозрачности нижней границы, что может внести дополнительный элемент неоднозначности в оценку характеристик звукового поля. Предпочтительнее располагать трассы распространения звука в шельфовых районах, где верхний слой донных отложений представляет собой слой ракушечников. В этом случае существуют углы полного внутреннего отражения для всех типичных гидрологических условий. Кроме того, отражательные свойства ракушечников выражены несколько сильнее, чем илов.

В некоторых случаях можно использовать временную зависимость свойств нижней границы волновода, например, тот факт, что нулевые значения коэффициента отражения не наблюдаются для типичной вертикальной структуры поля скорости звука в течение марта, апреля и мая.

Проведенные расчеты позволяют сформулировать некоторые рекомендации, которые могут оказаться полезными при практической реализации мониторинга шельфовой зоны северо-западной части Черного моря. Наибольшая дальность распространения звука достигается вдоль трасс в районах с дном в виде слоя ракушечников, тогда потерями при отражении от дна можно пренебречь в определенном диапазоне углов падения звуковой волны на дно. Если существует необходимость располагать трассы распро-

странения звука в районах с илистым дном, целесообразно формировать диаграмму направленности излучателя таким образом, чтобы исключить интервалы углов, при которых происходит проникновение звуковой волны в дно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sheldon J.* Multi-area estimates of acoustic transmission loss in coastal waters // *Sound Propag. And Underwater Systems. Meet. London, 1978, Extend. Abstrs.*— London, 1978.— P. 3.1/1-3.1/3.
2. *Дивизинюк М.М.* Черноморский подводный звуковой канал. Серия: Акустические поля Черного моря.— Севастополь: СНИГ, 1997.— 103 с.
3. *Lopes J.L.* Observation of anomalous acoustic penetration into sediment at shallow grazing angles // *J. Acoust. Soc. Am.*— 1996.— 99.— P. 2473-2474(A).
4. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана.— Л.: Гидрометеиздат, 1982.— 264 с.

Отделение гидроакустики
Морского гидрофизического института НАН Украины,
Одесса

Материал поступил
в редакцию 05.03.02

ABSTRACT Considered is the possibility of existence of the critical sound incident angles of a sound wave along two tracks of sound propagation that are typical for the northwestern shelf of the Black Sea from the viewpoint of characteristics of the wave-guide lower boundary and the spatial-temporal structure of the sound velocity field. The wave-guide lower boundary can show a property of acoustic transparency both for a near-surface sound channel and in the conditions of negative refraction if the bottom consists of fine silts. It is one of the reasons of considerable losses in sound propagation. The angles of total internal reflection exist for a bottom made up of shell rock under all hydrological conditions typical for this region. In the case when the bottom is made up of fine silts the angles exist under a definite vertical structure of the sound velocity field that gives a possibility to use the angle range permitting to neglect the losses resulting from the sound wave reflected from the bottom.