

- растворенных компонентов, по данным о бинарных растворах//Акуст. журн. 1987. Т. 33: № 4. С. 772—773.
13. Здановский А. Б. Закономерности в изменениях свойств смешанных растворов//Тр. соляной лаборатории АН СССР, 1936. Вып. 6. С. 570.
14. Денисов Д. А. Расчет плотности смешанных растворов, подчиняющихся правилу Здановского. М.: МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1985. Вып. 136. С. 129—136.
15. Денисов Д. А. Расчет коэффициентов расширения смешанных растворов, подчиняющихся правилу Здановского. М.: МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1989. Вып. 158. С. 165—174.

Московский химико-технологический институт им. Д. И. Менделеева

Поступило в редакцию  
28.12.91

После исправления  
30.12.92

УДК 534.21.1

© 1993 г. В. М. Кузькин

### ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ РЕФРАКЦИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ОБЛАСТИ ПОЛЯРНОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

На структуру и динамику водных масс океана, как показывают исследования последних лет, заметное влияние могут оказывать фронтальные зоны (ф. з.) [1]. Одним из проявлений ф. з. является вызванная ими горизонтальная (боковая) рефракция звуковых лучей, которая может быть положена в основу разработки акустического метода диагностики фронтов. В данной работе приводятся оценки угловых отклонений лучей в горизонтальной плоскости и вариации времен распространения, обусловленные океаническими фронтами.

Поскольку влияние ф. з. на условия распространения звука чрезвычайно велико, а информация об их пространственной структуре в настоящее время весьма скудная, целесообразно параметризовать фронтальный раздел, а значит, и вносимые им искажения поля скорости звука, опираясь на такие глобальные его параметры, как ширина, максимальный перепад температуры и глубина проникновения ф. з. В рамках такой малопараметрической модели можно получить ряд полезных результатов, касающихся влияния различных параметров ф. з. на прохождение звука, и оценить по порядку величины изменения фазового фронта и групповые задержки сигнала.

Гидрологическая структура ф. з., как показано в [1, 2], подвержена значительной пространственно-временной изменчивости. Поэтому анализ ее влияния на распространение звука должен привязываться к району проводимых исследований. Для составления представления о возможных оценках горизонтальной рефракции и связанных с ней эффектов можно отвлечься от тонкой структуры и топографической привязки ф. з. и рассмотреть ее влияние на примере простой модели фронтального водораздела, отвечающей линейному изменению температуры с глубиной.

Наибольшими контрастами в свойствах разделяемых водных масс северных морей, как известно, отличается полярная ф. з. Так, например, в западной части Баренцева моря, где полярная ф. з. наиболее стационарна и наблюдается круглый год, характерный горизонтальный градиент температуры оценивается как 0,3 град/км при ширине фронта  $L \approx 10$  км, перепад температуры по глубине ( $H \approx 300$  м) составляет в среднем  $\Delta T \approx 4^\circ$  [2]. Вне расположения ф. з. распределение поля температуры (и солености) можно полагать неизменным в горизонтальной плоскости. Значение температуры и солености на горизонте дна считаются постоянными. Соответствующие такой модели характеристики распределения скорости звука

$$c(z, r) = c_0(r) [1 - \kappa(r)z], \quad (1)$$

где

$$c_0(r) = c_* + ar, \quad \kappa(r) = \kappa_* + br, \quad 0 \leq |r| \leq L,$$

в направлении  $r$  нормали к линии фронта по порядку величины равны  $c_* = 1480$  м/с,  $a = 1,38$  м/км·с,  $\kappa_* = 4,14 \cdot 10^{-5}$  1/м,  $b = 3,04 \cdot 10^{-6}$  1/км·м, при этом  $c(r, H) = c(H) = \text{const}$ .

В рамках теории возмущений для лучей метод геометрической оптики для угла прихода  $\beta_m$  луча в горизонтальной плоскости, отвечающего  $m$ -й моде, дает следующее выражение [3]:

$$\beta_m = \left( \frac{1}{2Rf_{0m}} \right) \left| \int_0^R s \nabla_{\perp} \tilde{f}_m(s) ds \right|. \quad (2)$$

Здесь  $f_{0m}$  — невозмущенное значение квадрата собственных чисел;  $\nabla_{\perp} \tilde{f}_m$  — поперечный (по отношению к невозмущенному лучу) градиент возмущения  $\tilde{f}_m$ ;  $R$  — продольный размер горизонтальной неоднородности. Ин-



тегрирование в (2) ведется вдоль прямой, соединяющей источник с точкой наблюдения. (Расшифровку обозначений в правой части (2) см. в работе [3].)

Оценим углы прихода  $\beta_m$ . Соответствующие линейному профилю скорости звука (1) характеристики нормальных волн  $f_{0m}$  и  $\nabla f_m$ , отвечающие донным лучам, имеют вид [3]

$$f_{0m} = 1 + 2\kappa_* H_* - \left[ \frac{3\lambda\kappa_*}{2} (m - 3/4) \right]^{2/3}, \quad (3)$$

$$\nabla f_m(s) = \frac{df_m(s)}{ds} \sin \gamma, \quad (4)$$

где

$$\tilde{f}_m(s) = \left\{ \frac{-2}{c_* a} + \left( 2H_* - \frac{2}{3} \kappa_*^{-1/3} \left[ \frac{3}{2} \lambda (m - 3/4) \right]^{2/3} \right) b \right\} s = l_{ms}. \quad (5)$$

Здесь  $\lambda$  — длина звуковой волны;  $H_*$  — реперное значение глубины;  $\gamma$  — угол между нормалью к линии фронта и направлением невозмущенного луча,  $m = 1, 2, \dots$ . В (5) опущена составляющая, обусловленная изменением глубины волнового канала. Полагая в (2)  $R = L/\cos \gamma$ , получаем оценку углового отклонения луча от первоначального направления

$$\beta_m \approx \frac{L}{4} \left| \frac{\tilde{f}_m}{f_{0m}} \right| \operatorname{tg} \gamma. \quad (6)$$

Условия различимости мод горизонтальной линейной антенной приведены в работе [4].

Необходимо отметить, что область применимости формул (2), (6), как следует из условия малости поперечного размера френелевского объема невозмущенного луча по сравнению с размером неоднородности [5], определяется неравенством

$$\sqrt{L/\lambda} \gg \sqrt{\operatorname{tg} \gamma \sin \gamma}. \quad (7)$$

Если групповую задержку сигнала  $\tau_m$  вдоль луча, отвечающего  $m$ -й моде, представить в виде ряда теории возмущений  $\tau_m \approx \tau_{0m} + \tau_{1m} + \dots$ , то поправка первого порядка, характеризующая вариации времен распространения, обусловленных влиянием горизонтальных неоднородностей океана, равна [3]

$$\tau_{1m} = \frac{1}{2c_* \sqrt{f_{0m}}} \int_0^R \tilde{f}_m(s) ds. \quad (8)$$

Оценим ее по порядку величины. Подставив (5) в (8), для величины  $\tau_{1m}$  получим оценку

$$\tau_{1m} = \frac{\tilde{f}_m}{4c_* \sqrt{f_{0m}}} \times \frac{L^2}{\cos^2 \gamma}. \quad (9)$$

В качестве примера рассмотрим придонный волновод глубиной  $H_* = 300$  м с характеристиками ф. з., принятыми выше (см. (1)). Полагая длину волны  $\lambda = 10$  м, находим, что число мод, точка заворота которых лежит ниже границы раздела  $z = 0$ , равно семи. Оценки углов прихода  $\beta_m$ , значений  $\tau_{1m}$  и соответствующие им вариации фазы  $\Phi_{1m}$  ( $\Phi_{1m} = (2\pi/\lambda)c_* \tau_{1m}$ ) для случая  $\gamma = 45^\circ$ , отвечающие первым низшим семи модам, приведены ниже:

$\beta_m$ , град	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$
$\tau_{1m}$ , мс	6,2	15,3	22,0	27,8	33,0	37,7	42,2
$\Phi_{1m}$ , рад	5,7	14,3	20,5	25,8	30,6	35,1	39,3

Данный пример показывает, что оценки горизонтальной рефракции и связанных с ней эффектов растут с увеличением номера моды, т. е. к проявлениям ф. з. наиболее чувствительны высшие типы нормальных волн. Объяснение этого результата состоит в том, что океанологические неоднородности, вызванные ф. з., формируются в основном в верхних слоях океана [1], что мы и попытались смоделировать. Поэтому значения  $\beta_m$  и  $\tau_{1m}$ , найденные для донных лучей, следует рассматривать как предельные снизу оценки. Более реалистические числовые оценки горизонтальной рефракции звуковых волн в области ф. з. могут быть получены лишь на основе моделей, учитывающих их тонкую структуру.

Из (6) и (9) видно, что величины  $\beta_m$  и  $\tau_{1m}$  однозначно зависят от характеристик ф. з. и направления ориентации акустической трассы, что может быть использовано для решения обратной задачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
2. Быстров В. П., Володин В. В., Тарадин С. П. и др. Опыт автоматизированного картографирования гидрологических фронтов (на примере Баренцева моря): Препринт № 1432. М.: ИКИ АН СССР, 1988.



