АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1996, том 42, № 2, с. 269 - 273

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 551.463

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ПРИГИБРАЛТАРСКОМ РАЙОНЕ АТЛАНТИКИ

© 1996 г. Р. А. Вадов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 02.02.95 г.

В пригибралтарском районе Атлантики при проведении гидроакустических исследований в условиях двухканального профиля $C(z)$ на расстоянии от источника 134.5 км обнаружена сильная засветка нижнего канала в то время, как расчет, выполненный в предположении горизонтальной слоистости океана, при соответствующем расположении источника дает концентрацию звуковой энергии лишь на глубинах до 1000 - 1500 м (в верхнем канале).

В этом районе, как установлено океанологами, происходит образование линз средиземноморских вод, обнаруживаемых в различных регионах северной Атлантики. Допустив присутствие на дистанции 0 - 75 км такой линзы, удалось не только объяснить сам факт засветки глубин 1700 - 2800 м на этой дистанции, но и получить хорошее согласие расчетных и экспериментально зарегистрированных на этих глубинах уровней звукового поля.

В 1991 г. в 360 милях к западу от Гибралтарского пролива (между банками Ампер и Жозефина) проводились исследования распространения звука в океане. Профиль $C(z)$ в этом районе формируется под влиянием поступающих из Средиземного моря вод, отличающихся от собственно Атлантических более высокими температурой и соленостью. Размещаясь на глубинах 900 - 1400 м, эти воды приводят к образованию двухосного подводного звукового канала. Ось верхнего канала располагается на глубине 450 - 500 м, ей соответствует значение скорости звука 1503 ± 1 м/с. Ось нижнего канала располагается на глубине 2000 - 2100 м, ей соответствует скорость звука 1502 ± 1 м/с. Эти два канала разделены слоем средиземноморских вод, для которого максимальные значения скорости звука наблюдаются на глубинах 1100 - 1300 м. Для промежуточного слоя характерна заметная пространственно-временная изменчивость распределения значений скорости звука по слою, максимальных значений скорости звука в слое (от 1508 м/с до 1515 м/с) и местоположения этого максимума (от 1110 м до 1315 м). На рис. 1 представлен характерный для этого района профиль изменения скорости звука по глубине. Нанесенные на рисунок предельные значения скорости звука, зарегистрированные на глубинах 500 - 2000 м во время проведения исследований в районе (по материалам 25 гидрологических станций), дают наглядное представление об отмеченной выше изменчивости промежуточного слоя. О пространственно-временной изменчивости гидрологических условий в этом районе можно судить также по двум другим профилям $C(z)$ (рис. 2), которые были зарегистрированы в одной и той же точке с интервалом менее суток.

В этом районе были выполнены измерения вертикальной (энергетической) структуры звукового поля на различных расстояниях от источника. Источник непрерывного акустического сигнала размещался на глубине 150 м, которой соответствовало значение скорости звука 1506 - 1508 м/с. Изучался шумовой (в 1/3-октавной полосе) сигнал с центральной частотой несколько сот герц.

Измерения вертикальной структуры поля производились на следующих дистанциях от источника: 13.5, 34.5, 73.5, 91.0 и 134.5 км. Измерения выполнялись при непрерывном заглублении (подъеме) ненаправленной приемной системы. Заглубление (подъем) системы производилось со скоростью около 60 м/мин. Предельное заглубление системы в опыте составило 3400 - 3600 м. При этом регистрировалась вертикальная структура поля как в верхнем, так и в нижнем канале. Периодически при заглублении приемной системы производились измерения шумовой помехи, результаты которых учитывались при анализе полученных материалов.

Измерения вертикальной структуры проводились совместно с другими опытами и были растянуты во времени на двое суток.

Из-за весьма существенной пространственно-временной изменчивости поля скорости звука в этом регионе, а также из-за недостаточной обеспеченности проводимых исследований гидрологическими измерениями реальные океанологические условия на трассе распространения могли быть воссозданы лишь на основе совместного анализа материалов акустического опыта и всего

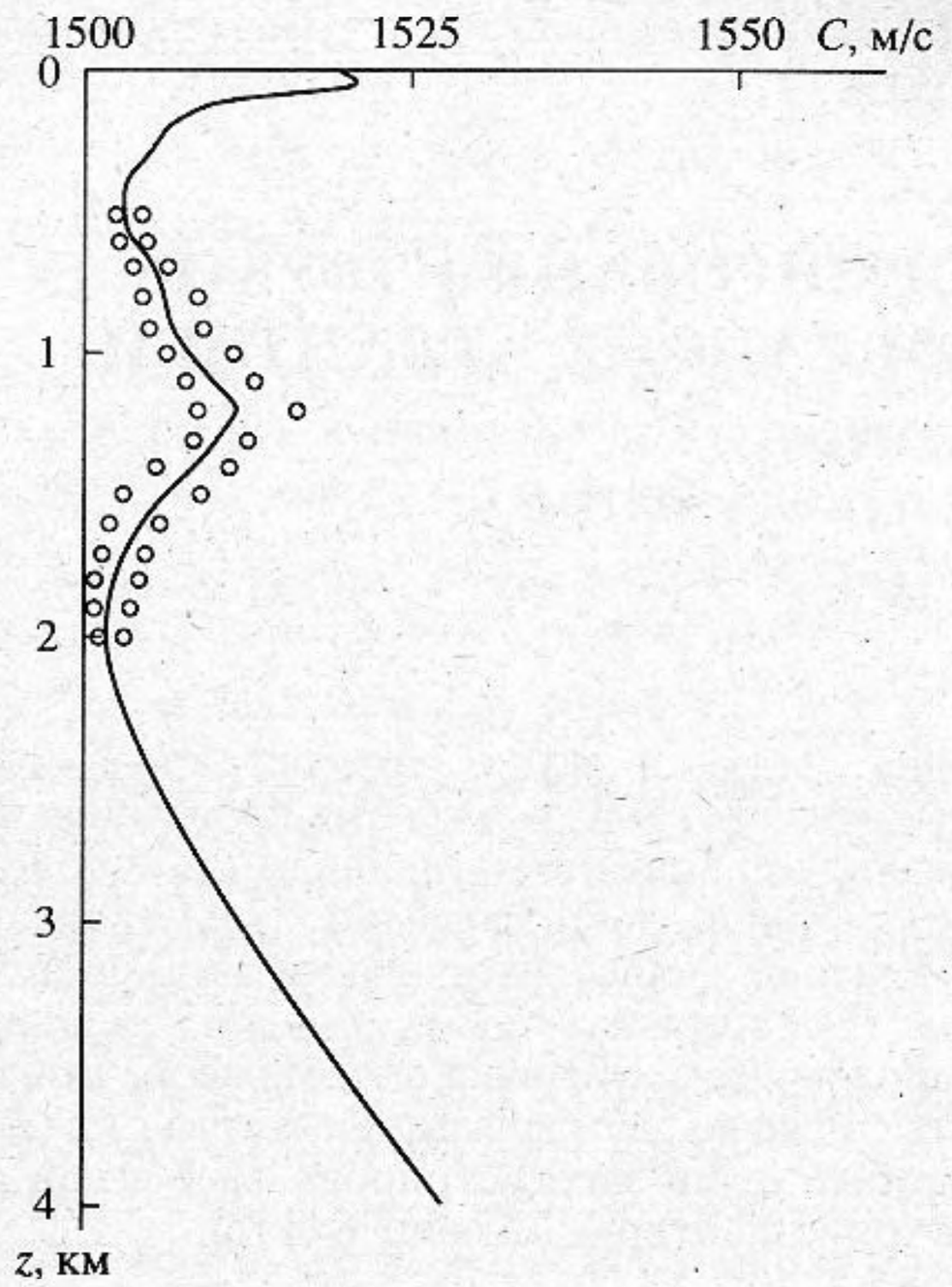

Рис. 1. Типичный для обследованного района профиль изменения скорости звука с глубиной. Для глубин 500 - 2000 м указаны предельные значения скорости звука, наблюдавшиеся во время работы в этом районе.

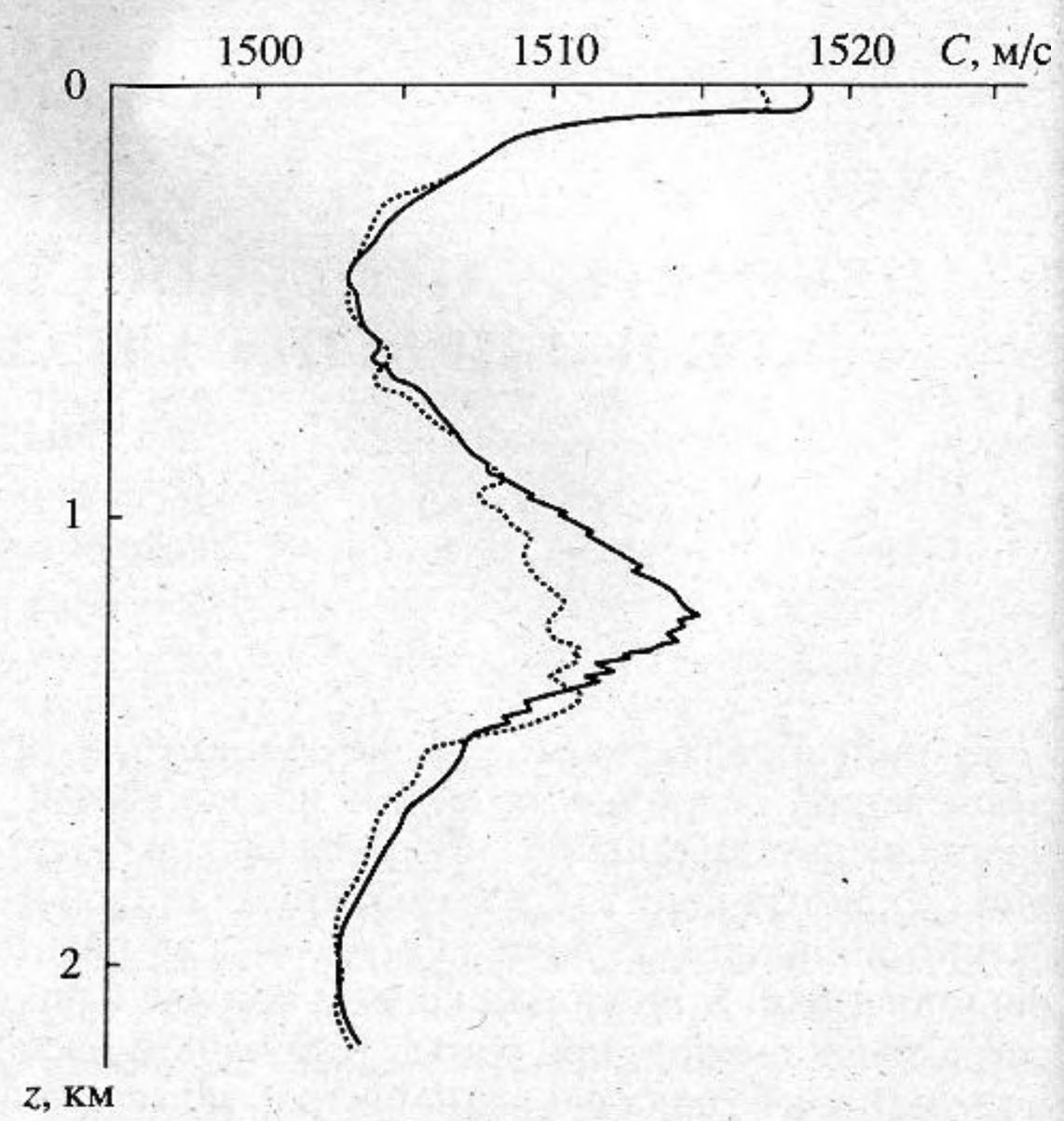

Рис. 2. Результаты измерений профиля $C(z)$, проведенных в точке приема во время проведения опыта с интервалом менее суток.

массива профилей $C(z)$, зарегистрированных в этом районе за полумесячный период работы в нем.

Наиболее интересные результаты акустических измерений представлены на рис. 3. В качестве исходного экспериментального материала для построения кривых, представленных на рисунке, использовались записи уровня звукового поля, выполненные на регистраторе типа 2307 фирмы "BrueI&Kjer" в режиме регистрации арифметических средних значений. Текущее усреднение при регистрации производилось на интервале 1 - 2 сек. Измерения выполнялись абсолютно калиброванными системами, что позволило результаты представить в виде зависимости от глубины потерь на распространение.

Основное внимание обратил на себя тот факт, что, исключая 13.5-километровую дистанцию, где засвечены лишь глубины 800 - 1600 м, на всех остальных дистанциях засвеченным оказался как верхний, так и нижний подводный звуковой канал. Такая особенность вертикальной структуры поля, имеющая простое объяснение, если дистанции от источника равны 34.5, 73.5 и 91 км, оказалась несколько неожиданной в случае дистанции, равной 134.5 км. При таком значении дистанции ожидалась засветка только верхнего канала.

Для осмысления полученных результатов на ЭВМ была проведена серия расчетов, в результате которых удалось создать приемлемую модель, объясняющую основные особенности формирования звукового поля в опыте.

Расчеты поля выполнялись в лучевом приближении по программе А.В. Вагина [1] в предположении энергетического суммирования сигналов, пришедших в точку приема по различным лучам. Коэффициент затухания звука в морской среде принимался в расчетах равным 0.016 дБ/км.

Экспериментальные материалы по вертикальной структуре поля на расстоянии 13.5 км от источника использовались для совместной калибровки излучающей и приемной систем. Расчет, выполненный в предположении горизонтально-слоистой среды (на этой дистанции это вполне допустимо) с учетом только водных (дно полагалось полностью поглощающим) лучей, был согласован с экспериментом (рис. 3а). По результатам согласования, выполненного для основной энергонесущей части вертикальной структуры поля, был определен коэффициент, позволяющий производить пересчет уровней звукового поля, фиксируемых на разных глубинах и дистанциях от источника, в значения распространенческих потерь. Расчет проводился для профиля изменения скорости звука с глубиной, представленного на рис. 1.

Для вертикальной структуры поля, зарегистрированной на расстоянии 34.5 км от источника

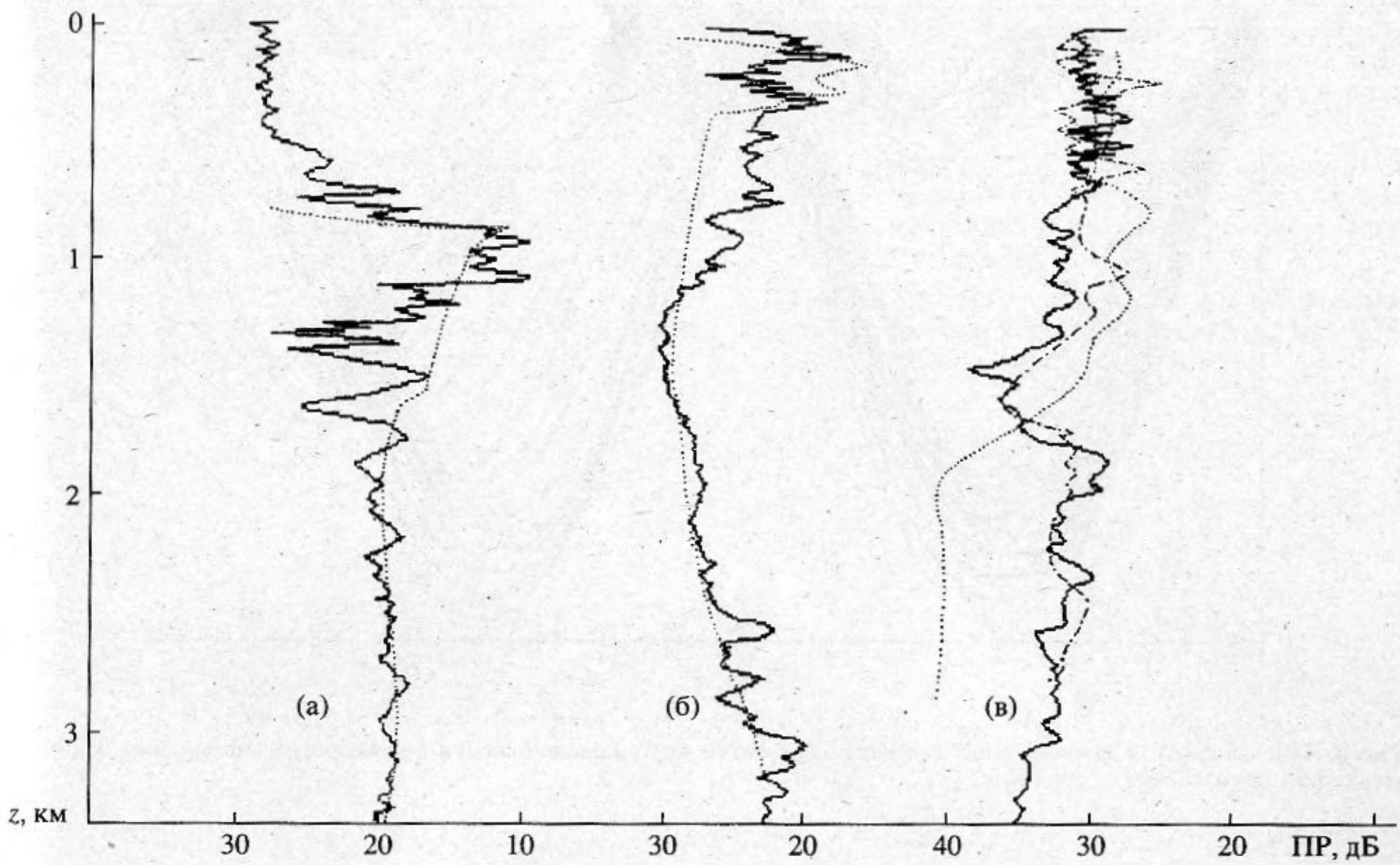

Рис. 3. Результаты проведенных измерений вертикальной структуры звукового поля. Сопоставление с расчетом, $z_{ист}$ = 150 м. По оси абсцисс отложены потери на распространение (ПР) в дБ относительно уровня излучения, приведенного к дистанции 1 км. а – расстояние от источника 13.5 км, б – расстояние от источника 34.5 км, в – расстояние от источника 134.5 км. · · · · · · – расчет для модели горизонтально слоистой среды, –·–·–·– – расчет для модельной ситуации при расположении линзы средиземноморских вод на трассе распространения.

характерен участок, расположенный на глубинах 1000 - 2000 м, где звуковое поле полностью определяется сигналами, отраженными от дна и поверхности. Этот факт был использован для оценки акустических характеристик дна (поверхность океана считалась абсолютно отражающей, так как волнение не превышало 1 балла). Добиваясь для этой дистанции удовлетворительного согласия расчетных уровней звукового поля с экспериментальными (на указанных выше глубинах) были подобраны приемлемые характеристики дна: $\mathrm{Re}(C_д/C_в) = 1.035$, $\mathrm{Im}(C_д/C_в) = -0.01$, плотность грунта 1.7 г/см^3. В качестве модели дна принималось жидкое полупространство; $C_д$ – скорость продольных волн в грунте, $C_в$ – скорость звука в придонных слоях воды. На рис. 3б результаты расчета приведены в виде пунктирной линии. На глубинах 1000 - 2000 м согласие расчета с экспериментом достаточно хорошее. Для других характеристик дна, использовавшихся в расчетах, были зафиксированы более существенные расхождения с экспериментом. При этом на степень согласия расчета с экспериментом на глубинах, где уровень звукового поля определялся не только и не столько сигналами, отраженными от дна, сколько чисто водными сигналами, внимание не обращалось – расчеты проводились для профиля $C(z)$, зафиксированного в точке приема и не отражающего ситуацию на всей трассе распространения.

Особый интерес представила структура поля, зафиксированная на дистанции 134.5 км (рис. 3в). В условиях горизонтально-слоистой среды зона засветки на этой дистанции должна была бы сформироваться в верхнем канале. Однако, реально были зарегистрированы две зоны засветки – у поверхности (как и ожидалось) и на глубинах 1700 - 3000 м, т.е. в нижнем канале.

При поиске возможной гидрологической ситуации, способной объяснить экспериментальный факт, были оценены длины полного цикла предельных лучей в верхнем (назовем их лучами типа А1) и нижнем (назовем их лучами типа А2) каналах, длина цикла предельных лучей, общих для этих каналов (назовем их лучами типа А0). Были определены дистанции, на которых лучи типа А0 пересекают горизонт 1200 м при их заглублении и выходе к поверхности. Был проведен анализ возможных пространственных мезомасштабных

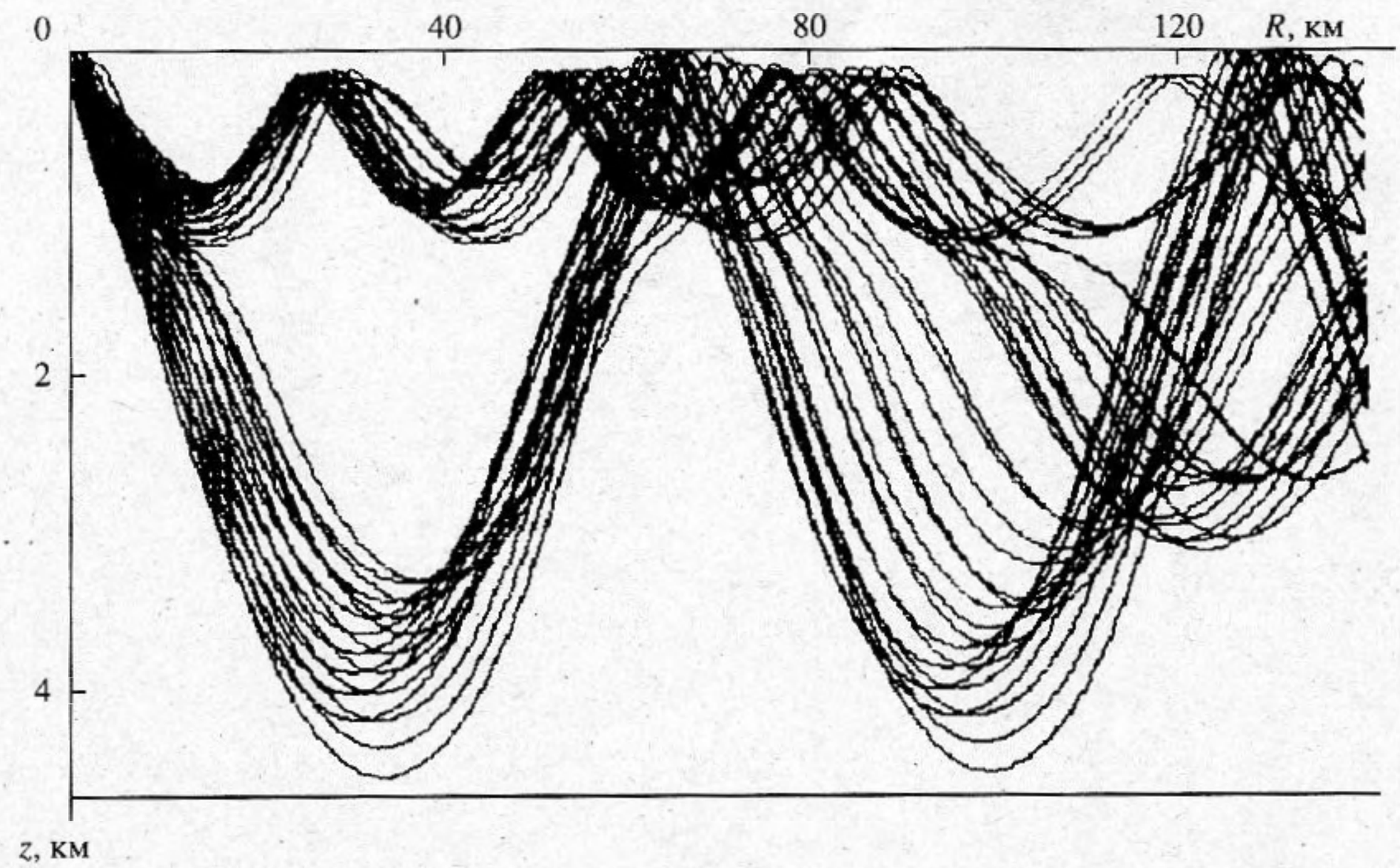

Рис. 4. Лучевая картина, рассчитанная для модельной ситуации при расположении линзы средиземноморских вод на трассе распространения, $z_{ист}$ = 150 м.

неоднородностей среды, реально допустимые изменения максимальных значений скорости звука на границе между верхним и нижним каналами. Были приняты во внимание также результаты проведенных в последние годы океанологических исследований, показавших, что внедрение средиземноморских вод в атлантические происходит, как правило, с образованием линз, характерные размеры которых составляют 50 - 100 км по горизонтали и 200 - 400 м по вертикали [2, 3].

В предположении существования на трассе распространения пространственной неоднородности типа линзы была построена довольно грубая расчетная модель. Линза с максимальным значением скорости звука (1515 м/с) на глубине 1200 м располагалась на участке трассы 0 - 75 км. Для описания гидрологической обстановки на этом участке трассы (с учетом реально наблюдавшегося разброса значений скорости звука на различных горизонтах) был подобран соответствующий профиль $C(z)$. Предполагалось, что на расстояниях, превышающих 90 км, линза отсутствует: значение скорости звука на глубине 1200 м (в максимуме) полагалось равным 1508 м/с. Для этой части трассы аналогичным образом был подобран свой профиль $C(z)$. На участке 75 - 90 км происходила плавная трансформация одного профиля $C(z)$ в другой.

Результаты расчета вертикальной структуры поля, выполненные для такой модельной ситуации, представлены в виде штрихпунктирной линии на рис. 3в. Наблюдается вполне приемлемое согласие с экспериментом.

На рис. 4 для модельной ситуации (присутствие на трассе распространения линзы средиземноморских вод) представлена лучевая картина, из которой становится понятен механизм засветки нижнего канала на расстоянии 134.5 км от источника. Сформировавшиеся в зоне нахождения линзы лучи типа A1 преобразуются в лучи типа A0 на участке трассы 75 - 110 км, где линза отсутствует. Именно благодаря этим лучам и происходит засветка нижнего канала на расстоянии 134.5 км от источника.

Оказывается, при различных положениях линзы на трассе распространения вполне возможны такие условия, при которых некоторые лучи типа A0 преобразуются в лучи типа A2 (захватываются нижним каналом) и наоборот. Более того, возможна трансформация лучей типа A1 в лучи типа A2, а также другие трансформации.

Если на горизонте излучения скорость звука C_0, то могут трансформироваться из класса A0, A1 в класс A2 лучи, для которых угол выхода из источника (θ) удовлетворяет условию:

$$\arccos(C_0/C_н) \le \theta \le \arccos(C_0/C_в),$$

где $C_н$ и $C_в$ – пределы изменения максимального значения скорости звука на границе между верхним и нижним каналами ($C_в > C_н$).

Степень захвата, а также степень размазывания по глубине звуковой энергии, распространяющейся вдоль этих лучей, существенным образом зависит от геометрических размеров линзы и ее местоположения на трассе распространения.

Таким образом, в условиях проведенного опыта вертикальная структура поля на расстояниях, соответствующих первой, второй зонам конвергенции (определенным для лучей класса А0), оказалась весьма чувствительной к присутствию на трассе распространения неоднородностей среды типа линз средиземноморских вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вагин А.В.* Расчет лучевых картин, суммарного звукового поля, его угловой, временной, фазовой и энергетической структуры в двумерно-неоднородной среде. // Отчет. М.: АКИН, 1974.
2. *Мальцев Н.Е., Сабинин К.Д., Фурдуев А.В.* Акустико-океанологический эксперимент на линзе средиземноморских вод в Атлантическом океане. // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 1. С. 86 - 93.
3. *Hebert D., Oakey N., Ruddick B.* Evolution of Mediterranean Salt Lens: Scalar Properties // J. Phys. Oceanography. 1990. V. 20. P. 1468 - 1483.