

УДК 551.463

© 1990 г.

*Н. Е. Мальцев, К. Д. Сабинин, А. В. Фурдуев***АКУСТИКО-ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА ЛИНЗЕ СРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ВОД В АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ**

Описываются результаты экспериментального акустико-океанологического обследования линзы средиземноморской воды в Атлантическом океане. Приводятся гидрологические характеристики линзы, демонстрируется влияние линзы на формирование акустического поля зондирующих сигналов и на пространственные характеристики поля собственных шумов акватории. Данные эксперимента по распространению сигналов сопоставлены с расчетом по лучевой трехмерной модели. При этом иллюстрируется соответствие эксперимента и расчета. Наличие линзы приводит к засветке геометрических зон тени, образованию новых областей конвергенции и радикальному изменению угловой и пространственно-лучевой структуры звукового поля.

Развитие акустических методов исследования океана базируется на знании эффектов, обусловленных неоднородностями среды в структуре акустических полей сигналов зондирующих источников звука или естественных шумовых полей акватории.

В марте 1989 г. в Канарской котловине Атлантического океана НИС «Академик Николай Андреев» обнаружил и обследовал крупную и чрезвычайно резкую неоднородность океана — глубоководную линзу теплых и соленых средиземноморских вод. Эта линза характеризуется, по-видимому, наибольшими из всех описанных до сих пор аномалиями океанологических характеристик (см., например, [1]).

Разница характеристик в ядре линзы по сравнению с окружающими водами достигает в слое 900—1000 м $4,6^\circ$ по температуре, 1,1% по солености и 18,6 м/с по скорости звука, а абсолютные значения температуры $12,8^\circ$ и солености $36,4\text{‰}$ близки к величинам, наблюдаемым в языке средиземноморских вод, которые вторгаются в Атлантический океан вблизи Гибралтарского пролива.

На рис. 1, а даны профили условной плотности $\sigma_t(z)$, температуры $T(z)$, солености $S(z)$ и скорости звука $c(z)$ по измерениям термосолезонда «Исток» в ядре линзы (станция № 116) и вне ее (станция С). На рис. 1, б приведена карта изолиний скорости звука на акватории линзы для горизонта 900 м, а на рис. 1, в — разрез (для поля скорости звука) через ядро линзы в направлении северо-восток — юго-запад, т. е. по трассе акустического опыта. Основная часть гидрологической съемки линзы была выполнена буксируемым вариантом «ИСТОКа» — «МИНИЗОНДОМ» МГИ 4205 до глубины 1 км на полном ходу судна (14 узлов). Зондирования в намеченных точках осуществлялись без манипулирования лебедкой при погружениях «МИНИЗОНДА» за время двух (иногда трех) циркуляций судна. Длина вытравленного кабель-троса была 2,6 км, а радиус и время циркуляций составляли соответственно 300 м и 6—8 мин. При этом «МИНИЗОНД» погружался с 50—60 м (глубина при буксировке на ходу) до 1—1,1 км. Такая методика, позволяющая проводить экспресс-обследования больших акваторий в несколько раз быстрее, чем при зондированиях на дрейфовых станциях судна, помогла найти линзу и выполнить ее квазисинхронную съемку в течение двух дней 10 и 11.03.89 г.

Отличия зафиксированных очертаний линзы от круговых (см. рис. 1, б), по-видимому, связаны с бароклинной неустойчивостью ее краев, хотя определенную роль могли играть и более короткопериодные изменения типа инерционных и приливных внутренних волн.

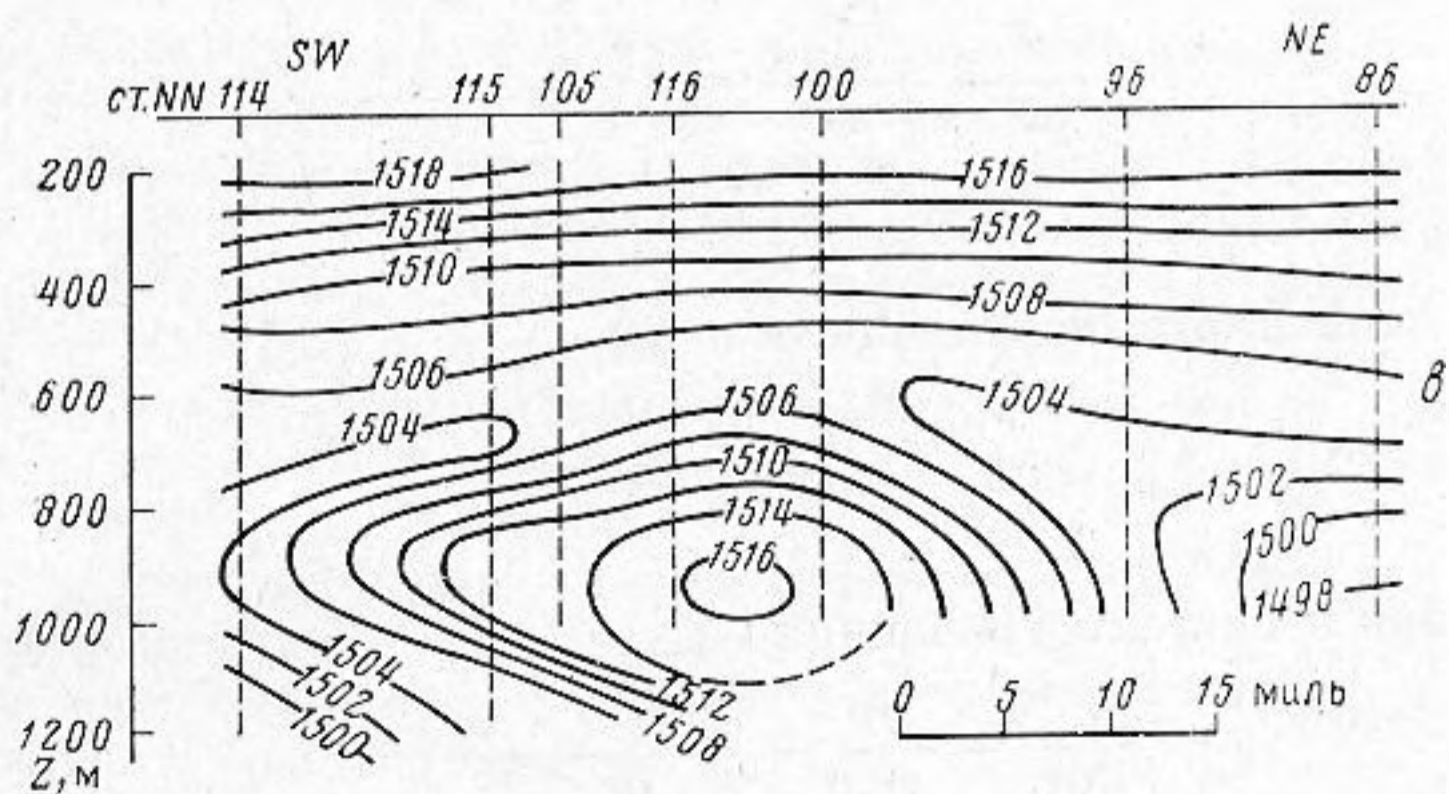
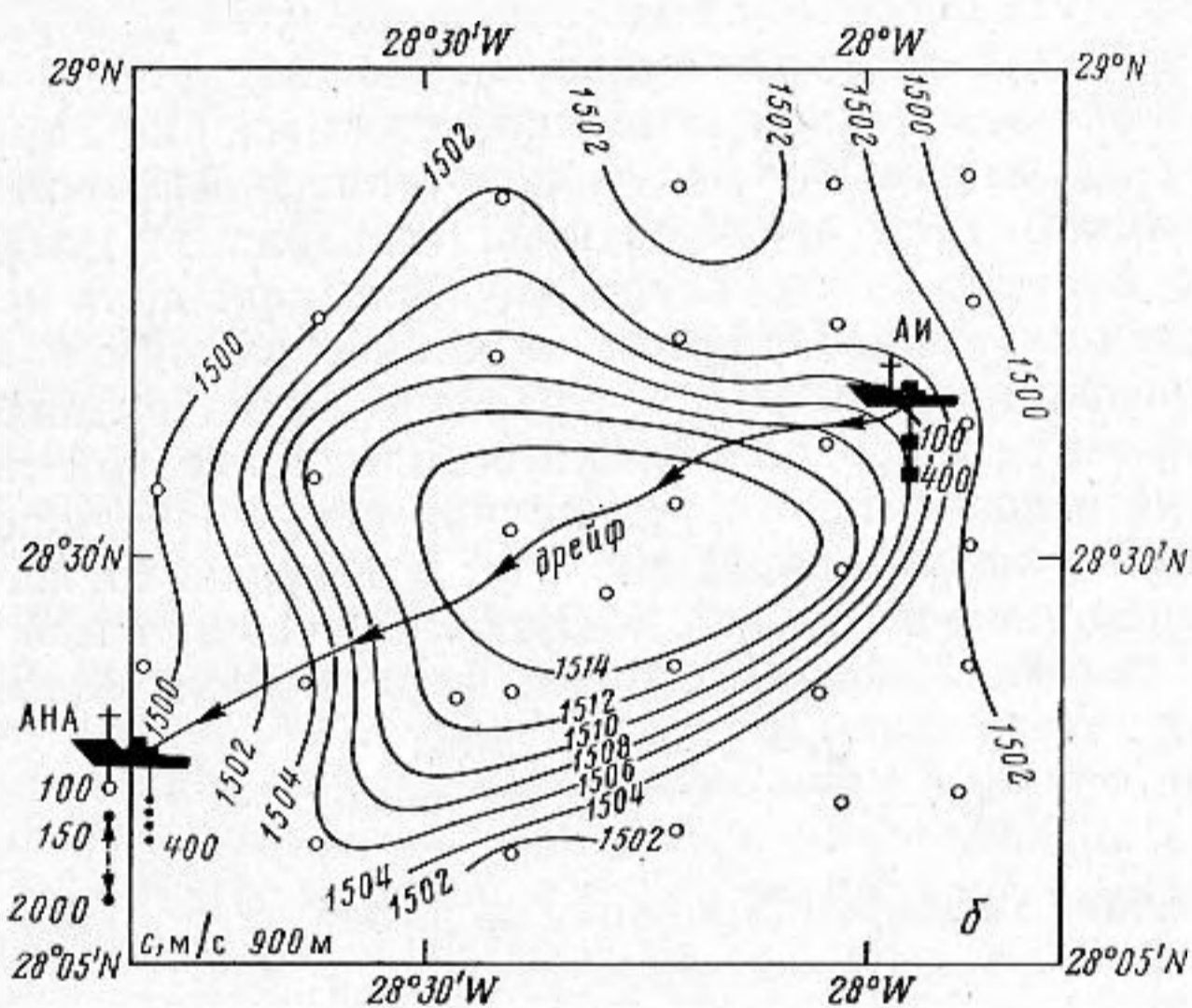
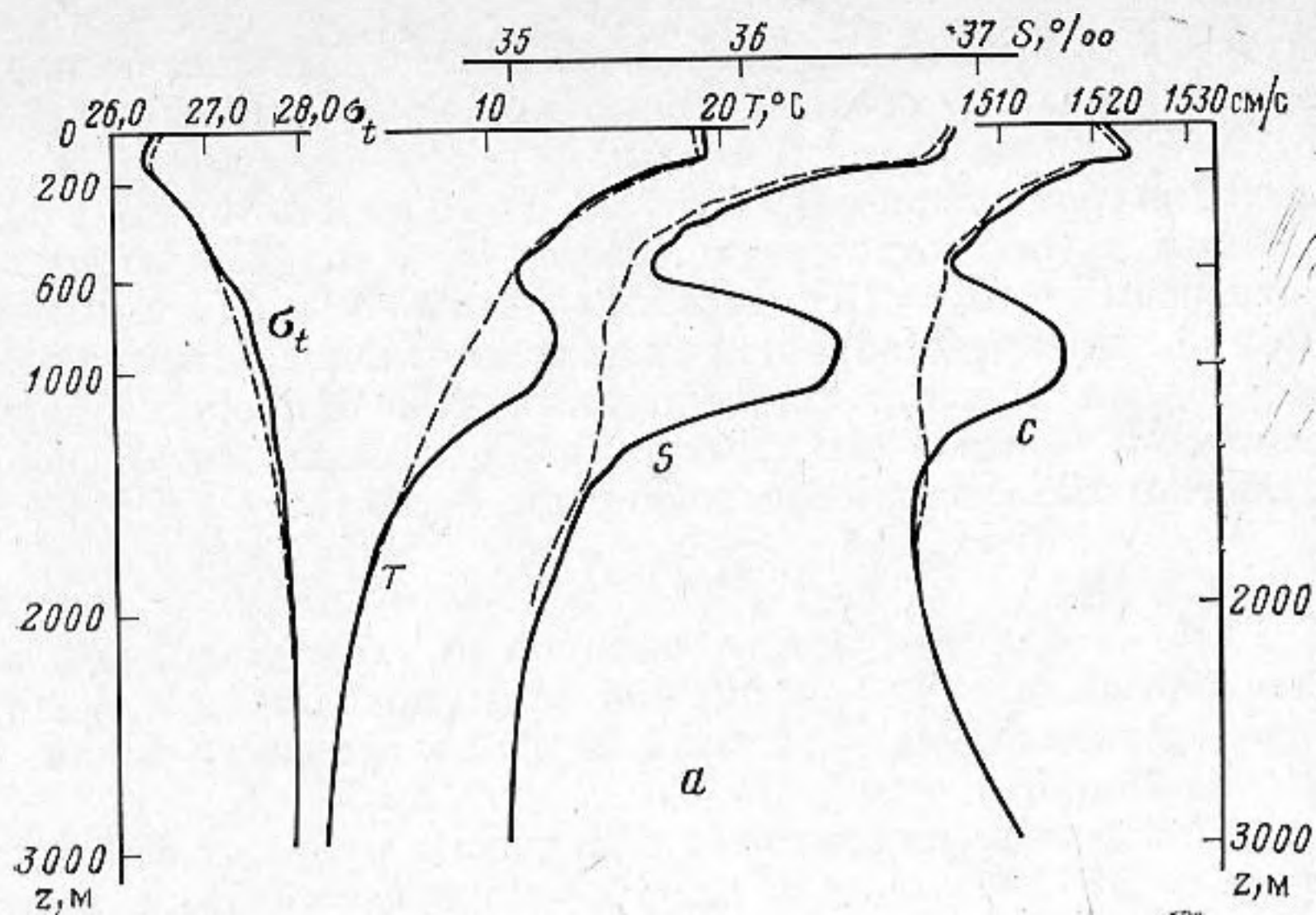


Рис. 1. Линза средиземноморской воды в Канарской котловине Атлантического океана. А — профили плотности $\sigma_t(z)$, температуры $T(z)$, солености $S(z)$ и скорости звука $c(z)$ (сплошная линия — ядро линзы, штриховая — фоновые условия). Б — карта линзы (горизонтальная плоскость на глубине 900 м) в изолиниях скорости звука и трасса акустического разреза. АИ — НИС «Академик Иоффе», АНА — НИС «Академик Николай Андреев». Цифры под судами — глубины погружения приемных и излучающих систем; В — разрез линзы (вертикальная плоскость) в изолиниях скорости звука слева направо — от юго-запада на северо-восток

Повторная съемка линзы 27 и 28.03.1989 г. выявила ее перемещение на запад-юго-запад со средней скоростью около 2 миль/сут (0,04 м/с) и поворот ее на 90° по часовой стрелке.

Определив средний диаметр линзы $d_{\text{л}} = 70$ км и ее толщину $h_{\text{л}} = 700$ м, что приблизительно соответствует объему вод с соленостью выше 35,5‰, имеем отношение $d_{\text{л}}/h_{\text{л}} = 10^2$. Поскольку наиболее вероятным механизмом образования линз представляется их отпочковывание от языка средиземноморских вод на пригибралтарской акватории в процессе бароклиной неустойчивости краев этого языка, можно ожидать, что размеры линз определяются соответствующим радиусом Россби¹:

$$R_h = Nh/f, \quad (1)$$

где $N = (g/\rho \cdot \partial\rho/\partial z)^{0,5}$ — частота плавучести, характеризующая стратификацию плотности ρ (g — ускорение силы тяжести), а $f = 2\Omega_3 \sin \varphi$ — параметр Кориолиса (Ω_3 — угловая скорость вращения земли, φ — географическая широта).

При фоновом значении частоты плавучести в слое от 600 м до 1300 м, равном $N = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, $f = 6,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ и $h_{\text{л}} = 0,7$ км имеем: $R_{\text{л}} = Nh_{\text{л}}/f = 28,4$ км, т. е. наблюдаемый радиус линзы 35 км лишь немногим больше радиуса Россби, как это и должно быть при образовании линзы вследствие бароклиной неустойчивости. Можно думать, что отношение $2N/f$ вообще является неплохой оценкой соотношения горизонтальных и вертикальных масштабов промежуточных линз в Мировом океане.

Наличие линзы типа обследованной (см. рис. 1) должно оказывать существенное влияние на структуру акустического поля источника звука и пространственные характеристики акустических шумов акватории.

Для построения модели распространения звука в линзе был использован лучевой метод в предположении о цилиндрической симметрии поля скорости звука относительно вертикальной оси, проходящей через центр линзы, т. е. поле скорости звука $c = c(r, z)$ в модели зависело от расстояния r от центра линзы и глубины z . В этом случае лучевые уравнения получаются из условия экстремальности функционала Ферма:

$$\delta \int \frac{(i^2 + z^2 + r^2 \dot{\varphi}^2)^{1/2}}{c(r, z)} dS = 0, \quad (2)$$

где точка означает дифференцирование по длине дуги вдоль луча, и имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{d}{dS} \left(\frac{\dot{r}}{c} \right) - \frac{r\dot{\varphi}^2}{c} - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{c} \right) &= 0, \\ \frac{d}{dS} \left(\frac{z}{c} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{c} \right) &= 0, \\ \frac{d}{dS} \left(\frac{r^2 \dot{\varphi}}{c} \right) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Замена независимого переменного в (3)

$$\sigma = \int_0^S c dS \quad (4)$$

приводит нас к системе уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{d\sigma^2} - \frac{\lambda^2}{r^3} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{c^2} \right) &= 0, \\ \frac{d^2 z}{d\sigma^2} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{c^2} \right) &= 0, \\ r^2 \frac{d\varphi}{d\sigma} &= \lambda. \end{aligned} \quad (5)$$

¹ При бароклиной неустойчивости наиболее быстро растут неоднородности с волновым числом $k \sim R^{-1}$ [2], а внутренний радиус Россби для промежуточного языка определяется его толщиной h .

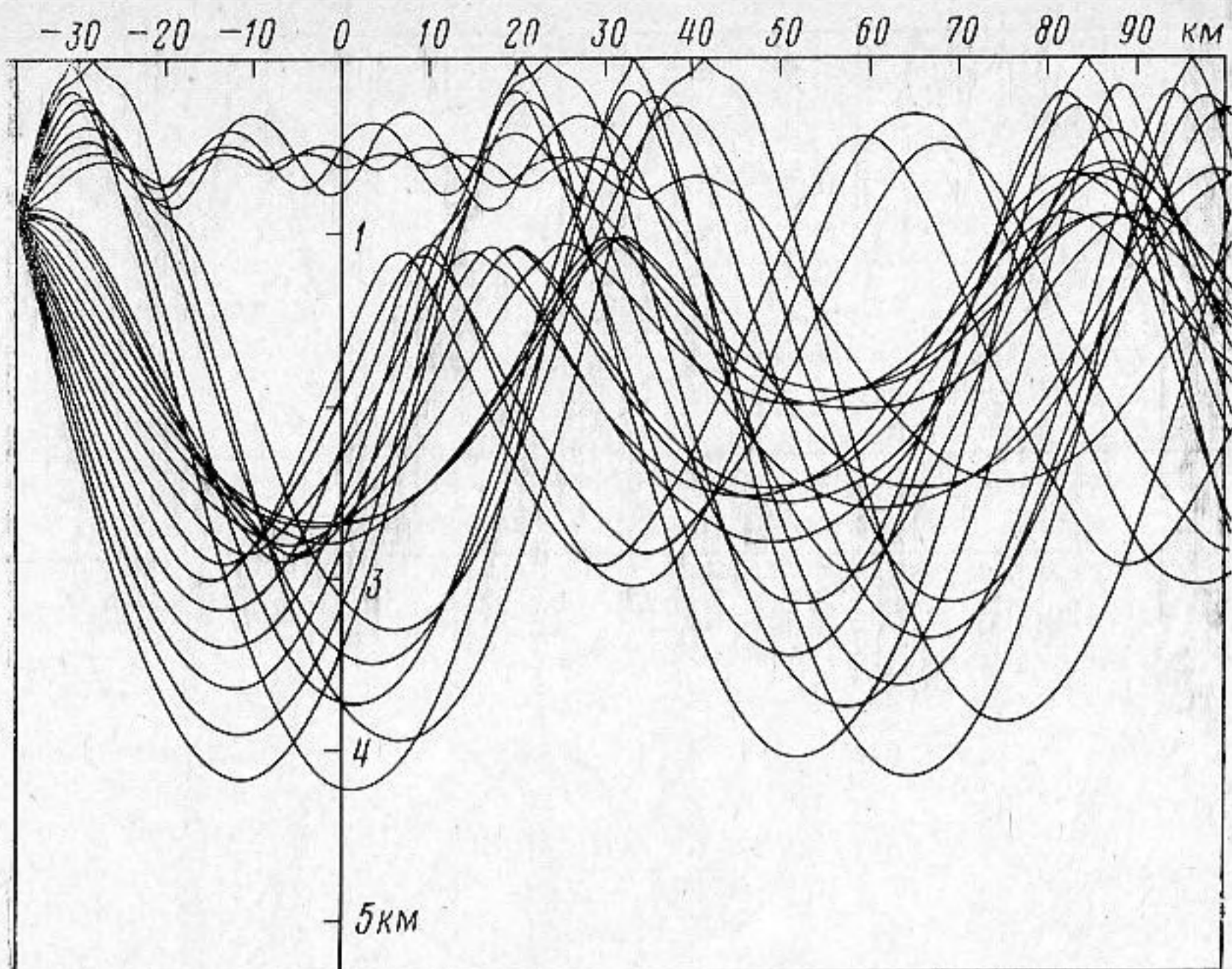


Рис. 2. Лучевая картина в присутствии линзы. По оси абсцисс — дистанция в км относительно оси линзы. По оси ординат — глубина в км

Для аппроксимации зависимости скорости звука от r и z использовалось разбиение плоскости (r, z) на треугольники, в каждом из которых величина $1/c^2(r, z)$ описывалась линейной функцией r и z . В этом случае решения уравнений (5) внутри каждого треугольника получаются в квадратурах, формулы для которых мы здесь не приводим в связи с их громоздкостью.

На основании соотношений, путь получения которых обрисован выше, была создана программа расчета лучевых траекторий. Результаты расчетов представлены на рис. 2. Здесь изображены лучевые траектории в океане, содержащем цилиндрически-симметричную линзу. Источник звука находится на глубине 900 м и на расстоянии 18 миль от центра линзы (вблизи края линзы, т. е. в точке, близкой к той, в которой находился излучатель при проведении натурального эксперимента).

Из графика на рис. 2 видно, насколько сильно отличается лучевая картина от традиционной, получаемой в горизонтально-однородной среде. Здесь явно обнаруживаются лучи, засвечивающие зону геометрической тени. Лишь достаточно крутые лучи повторяют зональную структуру. На рис. 2 расчет проводился лишь для диапазона углов места $\pm 12^\circ$, что, естественно, исключило из лучевой картины донные лучи и лучи, заворачивающиеся вблизи дна. Следует отметить, что смещение источника относительно линзы на сотни метров по вертикали или на десятки километров по горизонтали ощутимо меняет лучевую картину.

Экспериментальное исследование закономерности формирования звукового поля в присутствии линзы средиземноморских вод было проведено на частотах в диапазоне 200—400 Гц и 2,6 кГц.

Излучатели были опущены с борта НИС «Академик Иоффе», который с помощью противодрейфного устройства удерживался над краем линзы в точке, показанной на рис. 1, б и обозначенной (А. И.)². На глубине 100 м находился низкочастотный излучатель, а на глубине 400 м — два излучателя, один из которых работал на частоте 385 Гц, а другой — на частоте 2,6 кГц. В ходе эксперимента приемное судно НИС «Академик Николай Андреев» (на рис. 1, б судно обозначено АНА) с опущенными гидрофонами и линейной вертикальной антенной дрейфовало, удаляясь от излучающего

² Авторы признательны начальнику экспедиции на НИС «Академик Иоффе» профессору Ю. Ю. Житковскому за содействие в проведении эксперимента.

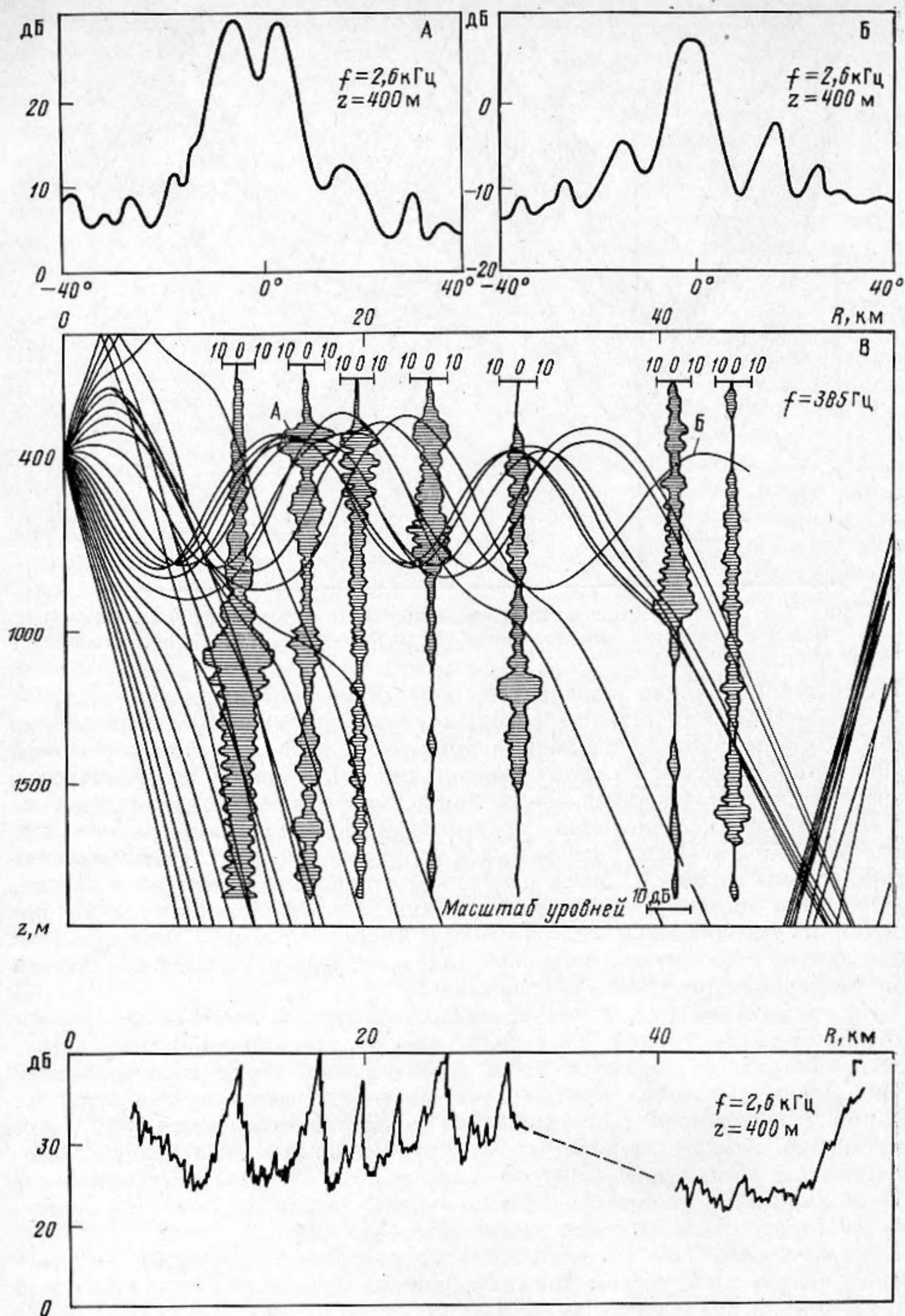


Рис. 3. Данные акустического эксперимента по трассе через линзу: А и Б — угловая структура поля в точках А и Б, В — лучевая картина (расчет) и вертикальные профили (150—2000 м) уровней звукового давления по трассе эксперимента. Г — уровни звукового давления по трассе эксперимента на горизонте 400 м

судна на юго-запад, со средней скоростью около 3 км/ч. Дистанция менялась от нескольких километров до 65 км.

Прием осуществлялся тремя системами: ненаправленным гидрофоном в приповерхностном звуковом канале (глубина 100 м), вторым ненаправленным гидрофоном, которым (в целях получения вертикальных профилей звукового давления) проводилось зондирование по глубине от 150 до 2000 м, и эквидистантной 32-гидрофонной вертикальной антенной общей длиной 9 м

на глубине 400 м. Основной лепесток диаграммы направленности антенны сканировал по углу места в пределах $\pm 90^\circ$ относительно горизонта в целях идентификации направлений прихода основных групп лучей и сопоставления с расчетной лучевой картиной.

На рис. 3 представлены некоторые результаты эксперимента по исследованию звукового поля источника. На среднем графике рис. 3, в по оси ординат нанесены глубины от поверхности до 2000 м, а по оси абсцисс — расстояния между излучающим и приемным судами. Здесь изображен результат расчета лучевой картины для условий эксперимента и нанесены отдельные данные о вертикальных профилях уровней звукового давления, полученных с зондирующего по глубине гидрофона. Заметно неплохое совпадение расчетных и экспериментальных данных, которые подтверждаются также угловыми диаграммами уровней, зарегистрированными антенной. (Точка А отстоит на 17—18 км от излучающего судна, точка Б — на 43 км). Естественно, что реальная картина сложнее, чем это следует из лучевых расчетов, которые изображены на рис. 3, в. Большую роль в формировании поля играют донные отражения и, вероятно, горизонтально рефрагирующие лучи, не учитываемые лучевой картиной вертикального сечения поля через центр линзы. Интересными представляются также эффекты периодической, по-видимому, флуктуирующей, утечки звуковой энергии из звукового канала над линзой (глубины 200—600 м) вниз. Этот эффект напоминает неоднократно анализировавшиеся ликиджи, однако для данного случая требует специального исследования. Для иллюстрации сказанного на рис. 3, в нанесен профиль вертикального зондирования звукового поля в 30 км от источника (пятый слева), образующий на глубине около 1400 м ярко выраженный максимум.

На нижнем графике рис. 3, г представлена картина горизонтального сечения звукового поля, построенная по данным одного из ненаправленных гидрофонов вертикальной антенны на глубине 400 м для частоты излучения 2,6 кГц. Здесь следует отметить высокие уровни засветки зоны геометрической тени рефрагирующим в линзе сигналом и наличие обычной (для фоновых условий) зоны конвергенции, которая соответствует группе лучей, изображенных в правой части рис. 3, в. По оси ординат на рис. 3, г отложены уровни звукового поля в дБ относительно некоторого условного уровня, принятого за 0 дБ.

В целом приведенные данные иллюстрируют существенные изменения пространственно-энергетической и угловой структуры звукового поля в присутствии линзы, что открывает пути акустических методов обнаружения линз в океане.

Существенные изменения условий формирования звуковых полей, вносимые линзой, очевидно, должны найти свое отражение и в структуре характеристик динамических шумов акватории. Это предположение было экспериментально проверено при измерении характеристик анизотропии и спектральных уровней шумового поля в присутствии линзы средиземноморских вод.

Эксперимент был проведен с помощью высокочувствительной глубоководной эквидистантной вертикальной антенны, состоявшей из цепочки 32 ненаправленных гидрофонов (шаг 0,3 м) с глубоководным блоком формирования и управления диаграммой направленности на линейках приборов с зарядовой связью [3]. Для контроля условий антенна была оснащена датчиками глубины, температуры, крена / дифферента, системой контроля характеристик и телеметрией для управления углом фазирования. Сканирование главным лепестком диаграммы направленности осуществлялось в пределах $\pm 90^\circ$ относительно горизонта. Уровень электрических шумов каждого гидрофона антенны был несколько ниже собственных шумов океана при штиле. Антенна опускалась на семижильном кабель-троссе до глубины 3000 м.

На рис. 4 слева изображены профили скорости звука в ядре исследуемой линзы (штриховая кривая) и вне линзы (сплошная линия). Плотные звукорассеивающие слои, характерные для района работ, располагались на глубинах 100—400 м (на рис. 4 заштриховано). Измерение характерис-

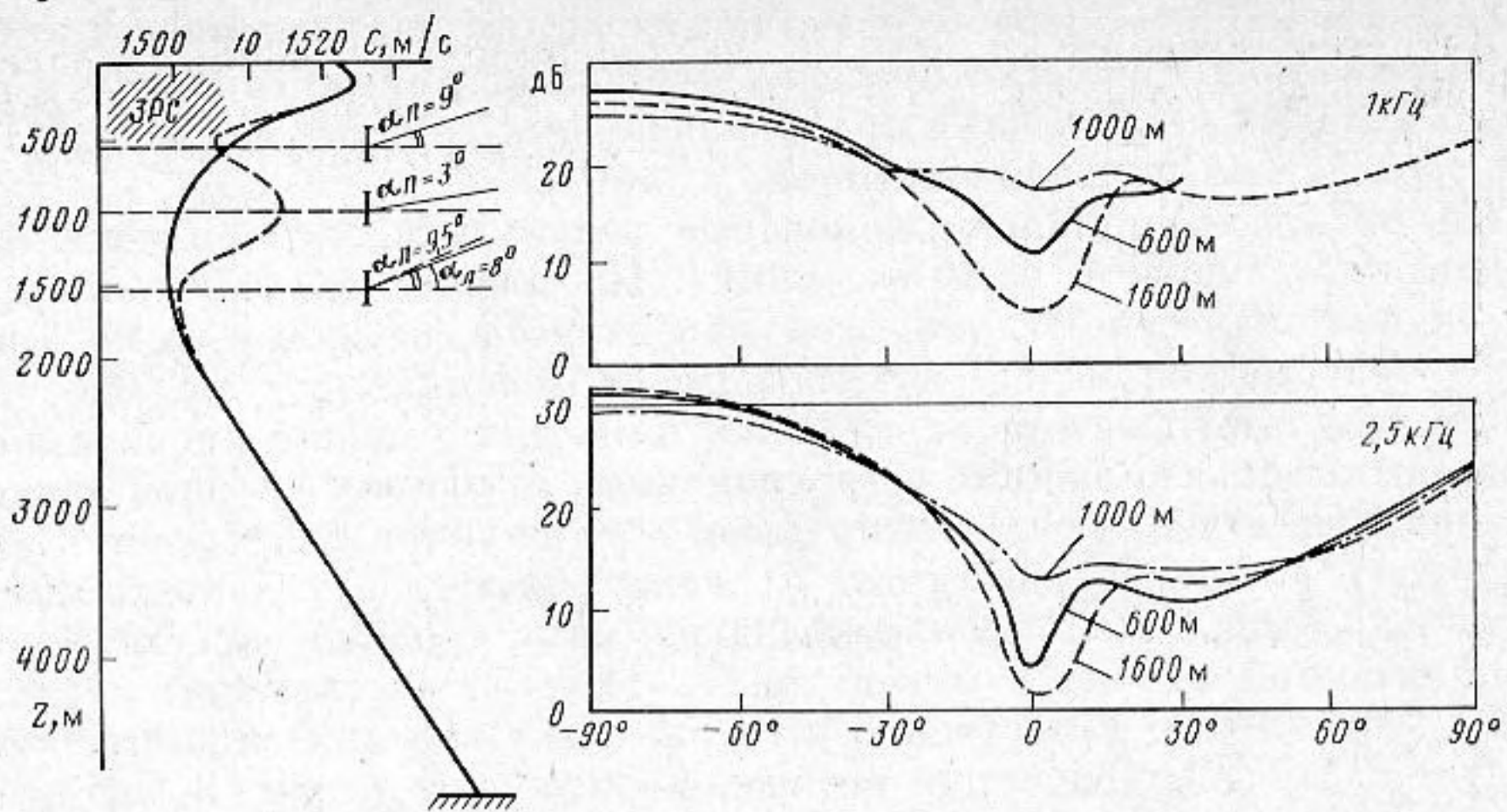


Рис. 4. Анизотропия поля динамических шумов в зависимости от глубины в ядре линзы. Слева — профили скорости звука, положения антенны и углы, ограничивающие зону рефракционного минимума. Справа — характеристики анизотропии; ось ординат — уровни звукового давления, ось абсцисс угол компенсации вертикальной антенны 0° — горизонт, -90° в поверхность

тик анизотропии шумового поля в вертикальной плоскости проводилось на глубинах 600, 1600 и 1000 м, т. е. на глубине звукового канала над линзой, под ней и на оси линзы соответственно в диапазоне частот от 500 Гц до 3 кГц. На рис. 4 символически изображены положения антенны и углы α_n , ограничивающие зону рефракционного минимума в характеристике анизотропии шума на соответствующих глубинах. Это углы, под которыми в точку приема приходит граничный луч, касательный к поверхности океана, где расположены источники динамических шумов. Из соотношения Снелиуса этот угол определяется формулой

$$\alpha_n = \arccos \frac{c_r}{c_n}, \quad (6)$$

где c_r и c_n — скорости звука на горизонте приема и у поверхности соответственно.

При приеме в ядре линзы на глубине 1000 м ожидалось, что $\alpha_n = 3^\circ$, а для глубины 1600 м $\alpha_n = 9,5^\circ$ (рефракционный минимум в характеристике анизотропии займет вокруг горизонта угловую область около 19°). Вследствие рефракции в линзе антенна, находясь под ней, не будет принимать рассеянный на ЗРС и «засвечивающий» рефракционный минимум шум, как это происходит для глубин приема над линзой (600 м) [4]. Действительно, расчет по (6) показывает, что для приема на горизонте 1600 м лишь лучи, принимаемые в диапазоне углов от 8 до $9,5^\circ$, несут в себе рассеянный на ЗРС шум. В диапазоне углов $\pm \alpha_n$ (см. рис. 4) лучи, рефрагируя в линзе, не будут достигать зоны ЗРС.

В правой части рис. 4 приведены характеристики анизотропии шума, подтверждающие вышесказанное. Здесь по оси абсцисс отложены углы фазокомпенсации антенны относительно горизонтального направления (направление на поверхность обозначено -90°). По оси ординат отложены уровни звукового давления, принятого направленной вертикальной антенной в ее диаграмме направленности для полосы частот $1/3$ октавы на частотах 1 и 2,5 кГц.

В настоящей работе приведены лишь некоторые результаты акустико-океанологического обследования линзы средиземноморской воды в Атлантическом океане. Предстоит дальнейший углубленный анализ полученных данных, которые могут оказаться полезными и при решении обратных задач акустики океана — обнаружения неоднородностей океана по особенностям распространения звуковых сигналов и по характеристикам естественных шумовых полей океана.

Авторы благодарят за участие в экспериментах своих соплавателей и особенно А. А. Аредова, Г. М. Дронова, А. В. Белова, А. Н. Гаврилова, А. А. Назарова, и В. Н. Колтакова, чья активная работа обеспечила успех экспедиции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Внутренние вихри в океане. Сб. статей. М.: ИО АН СССР, 1986. С. 142.
2. Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С. Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометиздат, 1987. С. 511.
3. Белов Д. В. Малогабаритный автономный блок формирования диаграммы направленности акустической системы. Судостроительная пром-сть. Сер. Акустика. 1988. Вып. 3. С. 75.
4. Аредов А. А., Охрименко Н. Н., Фурдеев А. В. Анизотропия шумового поля в океане (эксперимент и расчет) // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 2. С. 215—221.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
05.06.89

N. E. Maltsev, K. D. Sabinin, A. V. Furduev

AN ACOUSTIC-OCEANOLOGIC EXPERIMENT AT THE LENS OF MEDITERRANEAN WATERS IN THE ATLANTIC OCEAN

Analysis of hydrological data received in the Atlantic Ocean during the acoustic-oceanologic investigation of the lens of warm Mediterranean waters is described. The influence of the lens on fields of a point acoustic source and ambient noise is shown. Experimental data are in good agreement with the results of the three-dimensional ray theory. Distortion of the traditional layer model of the ocean caused by the lens leads to illumination of shadow zones, formation of new convergence zones, radical change of a ray structure of fields of a point source and ambient noise.