Том 39 Вып. 1

УДК 534.231.1

### © 1993 г. А.Н. Некрасов

# К ВЫЧИСЛЕНИЮ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ОБЛАСТИ ОКЕАНА СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ ДНА

В работе описан новый способ поиска лучей, соединяющих источник и приемник при распространении звука в прибрежном клине со сложным рельефом дна и скоростью звука в воде, зависящей только от глубины. Установлено, что при расположении приемников в ограниченной области пространства достигается значительный выигрыш в быстродействии. Приведены примеры расчетов.

Вычисление звукового поля в океане со сложным рельефом дна остается еще слабо разработанной проблемой, хотя имеется множество работ (например, [1–3]), посвященных методам и алгоритмам, позволяющим решать эту сложную задачу. Основная трудность состоит в том, что для определения звукового поля в интересных для практики ситуациях требуется провести большой объем вычислений. Так, при использовании лучевого метода приходится выпускать из источника огромное количество лучей в пределах заданного сектора углов выхода, чтобы соседние лучи имели одинаковый тип и тем самым была обеспечена сходимость итерационной схемы [4], ищущей луч, попадающий в приемник. В некоторых случаях требуемая густота "веера" составляет 100 лучей на градус как по азимутальному, так и по вертикальному углу. В результате для вычисления звукового поля по всей акватории, которую захватывают лучи, требуется провести миллионы лучей.

Не всегда, однако, необходимо вычисление звукового поля во всей исследуемой акватории. При наличии небольшого числа приемников теоретически возможно упрошение задачи за счет априорной информации об углах выхода из источника тех лучей, которые проходят в окрестностях приемников. Практически, однако, получение такой информации весьма затруднительно. Все же по крайней мере в одном случае возможно на этой основе достичь значительного упрощения задачи. Ниже описан этот случай и приводятся некоторые результаты вычислений.

Предположим, что источник и вертикальная цепочка приемников, проходящая от дна до поверхности, расположены в прибрежном клине, причем трасса распространения звука образует относительно малый угол с генеральным направлением изобат и, следовательно, трехмерность задачи выражена особенно сильно. Рельеф дна в клине может быть сильно пересеченным и должен быть аппроксимирован гладкой функцией горизонтальных координат. Скорость звука зависит только от глубины z и не имеет максимумов по z. Мы предполагаем, что цепочка приемников континуальна, т.е. в каждой точке отрезка находится приемник.

Очевидно, что проекцией нашей вертикальной цепочки приемников на горизонтальную плоскость является некоторая точка. Те лучи, чьи горизонтальные проекции проходят через эту точку, очевидно, попадают в один из приемников. Введем систему координат (x, y), как показано на рис. 1. Отклонение луча от цепочки приемников будем характеризовать функцией  $\eta(\varphi, \psi)$ , где  $\varphi, \psi$  — углы выхода луча из источника, вводи-

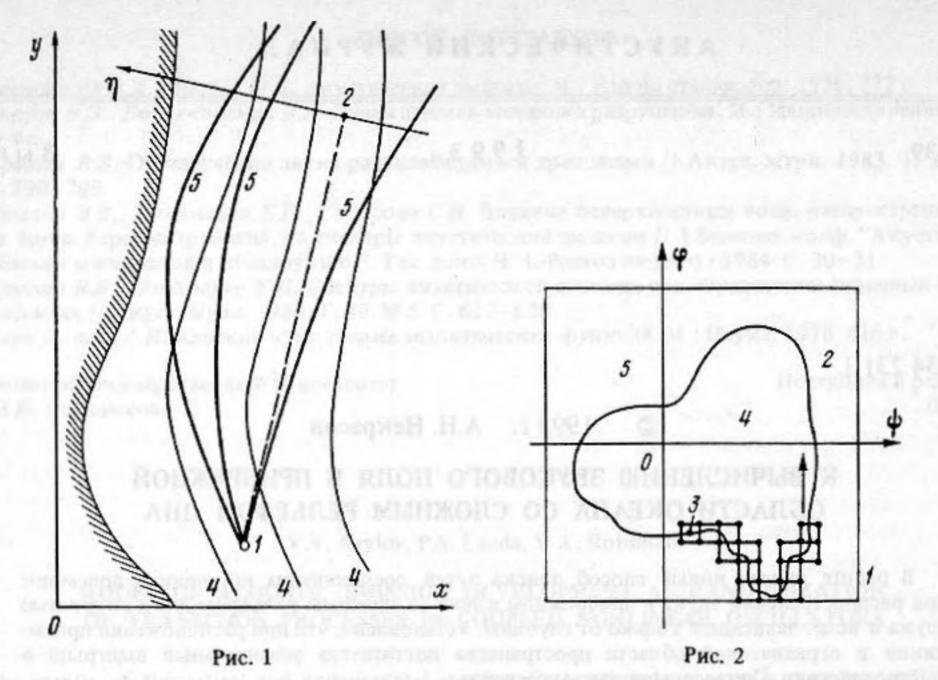


Рис. 1. Отклонение горизонтальных проекций лучевых траекторий от места расположения цепочки приемников. I — источник, 2 — место расположения цепочки приемников, 3 — суща, 4 — изобаты, 5 — горизонтальные проекции лучевых траекторий. Ось  $\eta$  ортогональна прямой 1—2

Рис. 2. Обход прицельного кольца. 1 — сектор углов выхода, 2 — прицельная кривая, 3 — начальная точка обхода, 4 — область, где  $\eta < 0$ , 5 — область, где  $\eta > 0$ . Выделены точки плоскости углов выхода, для которых проводится вычисление лучевых траекторий

мой как показано на рис. 1. Таким образом, поиск лучей, попадающих в приемники, сводится к решению уравнения

$$\eta(\varphi,\psi)=0.$$

Из условия гладкости дна и отсутствия максимумов на кривой c(z) следует непрерывность фукнции  $\eta(\varphi, \psi)$ . Очевидно также, что при больших вертикальных или азимутальных углах выхода луч вследствие многочисленных отражений от дна быстро уходит в сторону больших глубин, и для него  $\eta(\varphi, \psi) < 0$ . Можно доказать, что если уравнение (1) имеет решение, то при сделанных выводах о функции  $\eta$  множество точек плоскости  $(\varphi, \psi)$ , для которых удовлетворяется уравнение (1), является совокупностью замкнутых кривых, которые мы будем называть прицельными кольцами.

Таким образом, при вычислении звукового поля на вертикальном разрезе в прибрежной области океана оказывается возможным избежать проведения огромного количества лучей. Достаточно найти хотя бы одну точку на каждом прицельном кольце и затем выпускать лучи из источника с углами выхода, лежащими в ближайших окрестностях прицельного кольца, тем самым одновременно отслеживая его положение. Схема этого процесса представлена на рис. 2.

В случае правильного однородного берегового клина с углом раствора  $\pi/n$ , где n- целое число, при любом расположении источника и приемника возможно вычислить прицельное кольцо аналитически. Для этого нужно воспользоваться методом мнимых источников. Возникает цепочка мнимых приемников, в виде правильного n-угольника, лежащего в плоскости, ортогональной к ребру берегового клина, и построение прицельного кольца не вызывает затруднений.

При наличии зависимости скорости звука от глубины аналитическое вычисление

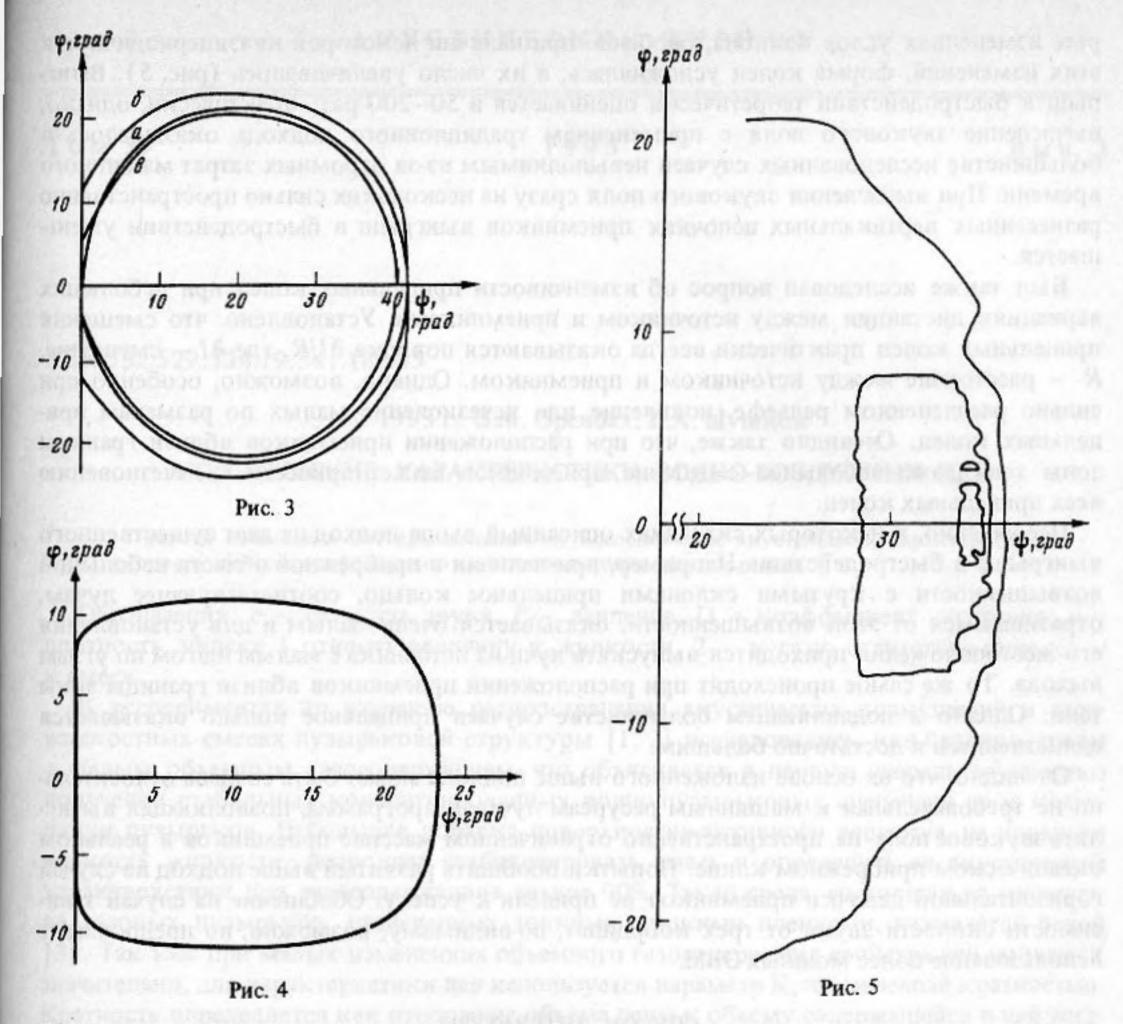


Рис. 3. Прицельные кольца для правильного клина с углом раствора 3 градуса и различных профилей скорости звука. a(z) = const; b(z) = 1.5 + 0.008 (км/с); b-c(0) = 1.54, b-c(0) = 1.54, b-c(0) = 1.505, b-c(0) = 1.50

Рис. 4. Прицельное кольцо, возникающее при распространении звука вблизи цилиндрически-симметричного берега. Рельеф дна:  $h(x, y) = 2 - 0,0002 (x^2 + y^2)$  (км), координаты источника (140; 10; 0,09) (км), горизонтальные координаты цепочки приемников (140,190) (км), c(z) = 1,5 + 0,008 z (км/c)

Рис. 5. Прицельные кольца при наличии периодичности в рельефе дна. Прицельное кольцо, содержащее углы выхода чисто водных лучей, показано частично. Рельеф дна:  $h(x, y) = -x \operatorname{tg} 3 +$  $+0,1 \sin(\pi y/10) + 0,4$ , координаты источника (50; 0; 0,09) (км), горизонтальные координаты цепочки приемников (50,110), c(z) = 1,5 + 0,008z (км/с)

прицельного кольца в таком же прибрежном клине уже невозможно, и приходится пользоваться описанной выше процедурой применения лучевого метода. Результаты представлены на рис. 3, откуда видно, что форма прицельного кольца может сильно зависеть от распределения скорости звука.

Для проверки возможностей практического использования нового подхода была разработана программа для IBM PC AT 386 на языке FORTRAN и проведены расчеты для прибрежных областей с различными по сложности рельефами дна. В случаях, когда углы наклона дна слабо зависят от горизонтальных координат, прицельное кольцо оказывается чаще всего единственным и имеет несложную форму (рис. 4). При быст-

рых изменениях углов наклона, особенно при наличии некоторой квазипериодичности этих изменений, форма колец усложнялась, а их число увеличивалось (рис. 5). Выигрыш в быстродействии теоретически оценивается в 50—200 раз; практически, однако, вычисление звукового поля с применением традиционного подхода оказывалось в большинстве исследованных случаев невыполнимым из-за огромных затрат машинного времени. При вычислении звукового поля сразу на нескольких сильно пространственно разнесенных вертикальных цепочках приемников выигрыш в быстродействии уменьшается.

Был также исследован вопрос об изменчивости прицельных колец при небольших вариациях дистанции между источником и приемниками. Установлено, что смещения прицельных колец практически всегда оказываются порядка  $\partial l/R$ , где  $\partial l$  — смещение, R — расстояние между источником и приемником. Однако, возможно, особенно при сильно расчлененном рельефе, появление или исчезновение малых по размерам прицельных колец. Очевидно также, что при расположении приемников вблизи границы зоны тени даже небольшое смещение приемников может привести к исчезновению всех прицельных колец.

Несомненно, в некоторых ситуациях описанный выше подход не дает существенного выигрыша в быстродействии. Например, при наличии в прибрежной области небольшой возвышенности с крутыми склонами прицельное кольцо, соответствующее лучам, отразившимся от этой возвышенности, оказывается очень малым и для установления его местоположения приходится выпускать лучи из источника с малым шагом по углам выхода. То же самое происходит при расположении приемников вблизи границы зоны тени. Однако в подавляющем большинстве случаев прицельное кольцо оказывается единственным и достаточно большим.

Очевидно, что на основе изложенного выше подхода может быть создана относительно не требовательная к машинным ресурсам лучевая программа, позволяющая вычислять звуковое поле на пространственно ограниченном массиве приемников в реальном океаническом прибрежном клине. Попытки обобщить развитый выше подход на случай горизонтальной цепочки приемников не привели к успеху. Обобщение на случай зависимости скорости звука от трех координат, по-видимому, возможно, но предполагает использование более мощных ЭВМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Winberg H., Burridge R. Horizontal ray theory for ocean acoustics /J. Acoust. Soc. Amer. V. 55. № 1. 1974. P. 63-79.
- Воронович А.Г., Гончаров В.В. Применение трехмернолучевого алгоритма к анализу звукового поля в океане в присутствии неоднородностей синоптических масштабов//Тр. IV Всесоюз. симпоз. по дифракции и распространению волн. Тбилиси: Изд-во ТГУ, 1985. Т. 2. С. 262–265.
- 3. *Мальцев Н.Е., Некрасов А.Н.* Вычисление волновых фронтов, создаваемых точечным источником в трехмернонеоднородном океане//Акуст. журн. 1987. № 3. С. 516—522.
- 4. Некрасов А.Н. О влиянии внутритермоклинного вихря на звуковое поле точечного источника в океане//Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 3. С. 261—267.

Акустический институт им. Н.Н. Андреева Российской академии наук Поступила в редакцию 29.01.92

#### A.N. Nekrasov

## NEW APPROACH TO RAY CALCULATIONS IN THREE-DIMENSIONAL REALISTIC COASTAL WEDGE

A new method for the calculation of rays connecting the source and the receiver is described for the case of sound propagation in a realistic coastal wedge with the complex relief of the bottom and the sound velocity in water depending on depth only. The fact is used in this case that the exit angles of all rayspassing under a given point of the ocean surface are localized at closed curves in the plane of exitrays. It is revealed that a significant gain in fast-action is attained in the case when the receivers are positioned in a limited area. The examples of calculations are given.