

## О ВОЗМОЖНОСТЯХ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВИХРЕВОГО ОБРАЗОВАНИЯ

В. К. БОГУШЕВИЧ, Л. Н. ЗАМАРЕНОВА, М. И. СКИПА

*Отделение гидроакустики МГИ НАН Украины*

The problem of vortex sound velocity field anomaly reconstruction by anomalies of signal travel times is considered. The reconstruction method is based on likeness and convergence of non-anomaly and anomaly rays with the same cycle number, on using of gentle and steep non-anomaly rays for scanning of vortex.

Лучевой подход к решению задачи акустического мониторинга морской среды и ее неоднородностей основан на измерении времен распространения сигналов  $T_m$  по лучам  $\Gamma_m$  в аномальном поле скорости звука,  $c = c_0 + \Delta c$ , и времен  $T_m^0$  по лучам  $\Gamma_m^0$  в опорном поле  $c_0$ . Аномалию поля  $\Delta c(x, y, z, t)$  восстанавливают по совокупности аномалий времен,  $\Delta T_m = T_m - T_m^0$ , сигналов лучей, пересекающих неоднородность. Задача восстановления аномалии  $\Delta c$  очень сложна и обычно ее упрощают путем линеаризации и замены аномальных траекторий  $\Gamma_m$  неаномальными  $\Gamma_m^0$  и интегрирования аномалии поля по аномальным участкам неаномальных траекторий [1, 2]. Применение для мониторинга лучевого зондирования и реконструкции на основе неаномальных лучей особенно эффективно в условиях Черного моря с его большой пространственной плотностью лучевых траекторий [3]. В работе [4] показано, что для многих неоднородностей Черного моря отличие аномальных и неаномальных лучей «не велико». Это обеспечивает при использовании последних для восстановления аномалии поля «хорошую» точность.

Вопросы восстановления аномалии поля слабоградиентной антиволноводной аномалии рассматривались в работе [3]. Здесь же рассматривается более сложная задача – восстановление поля неоднородности больших вертикальных размеров со сложной структурой – вихря. В Черном море длины циклов лучевых траекторий достигают 40 км. В этих условиях можно при лучевом зондировании и лучевой реконструкции определять пространственное положение вихрей с горизонтальными размерами  $L \sim 35$  км. При этом большая пространственная плотность лучевых траекторий позволяет ожидать хорошей точности восстановления аномалий их полей. Вопросам возможности восстановления и методики восстановления аномалии поля вихревого образования и посвящена эта работа.

### ОБЪЕКТ РАССМОТРЕНИЯ

Возможность восстановления поля скорости звука рассматривалась на примере вихря с вертикальным размером  $B \sim 500$  м и горизонтальным размером  $L \sim 25$  км на трассе зондирования протяжённостью  $r=180$  км. В качестве акустической модели вихря принималась аномалия поля скорости звука (рис. 1 а), полученная по данным о его полях температуры и солёности [5]. Вертикальный профиль скорости звука в среднем сечении вихря, аномальный, и профиль за его пределами, неаномальный, показаны на рис. 2, профиль аномалии скорости звука в его среднем сечении показан на рис. 3.

**МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ АНОМАЛИИ ПОЛЯ**

Метод восстановления основан на родственности аномальных и опорных лучей с одинаковым числом циклов (если  $\Delta c/c_0 \rightarrow 0$ , то  $\Gamma_m \rightarrow \Gamma_m^0$  и  $\Delta T_m \rightarrow 0$ ) и сходимости опорного луча к аномальному,  $\Gamma_m^0 \rightarrow \Gamma_m^* \rightarrow \Gamma_m$ ,  $\Delta T_m^* \rightarrow \Delta T_m$ , при приближении расчетных значений аномалии поля к фактическим,  $\Delta c_i^* \rightarrow \Delta c_i$ . Значения аномалии поля  $\Delta c(r_i, z_i)$  восстанавливались в шести вертикальных сечениях вихря,  $r_i$ , на глубинах точек заворота опорных лучей  $z_i = z_m^0$ . На каждой из глубин  $z_i$  значения  $\Delta c(r_i)$  задавались таким образом, чтобы для расчетного луча  $\Gamma_m^*$  обеспечивалось  $\Delta T_m^* \rightarrow \Delta T_m$ . Шаг по дальности между сечениями принимался равным  $\Delta r = 5$  км. Между сечениями принималась линейная интерполяция поля по дальности. Два дополнительных сечения с тем же шагом по дальности задавали нулевой уровень аномалии поля.

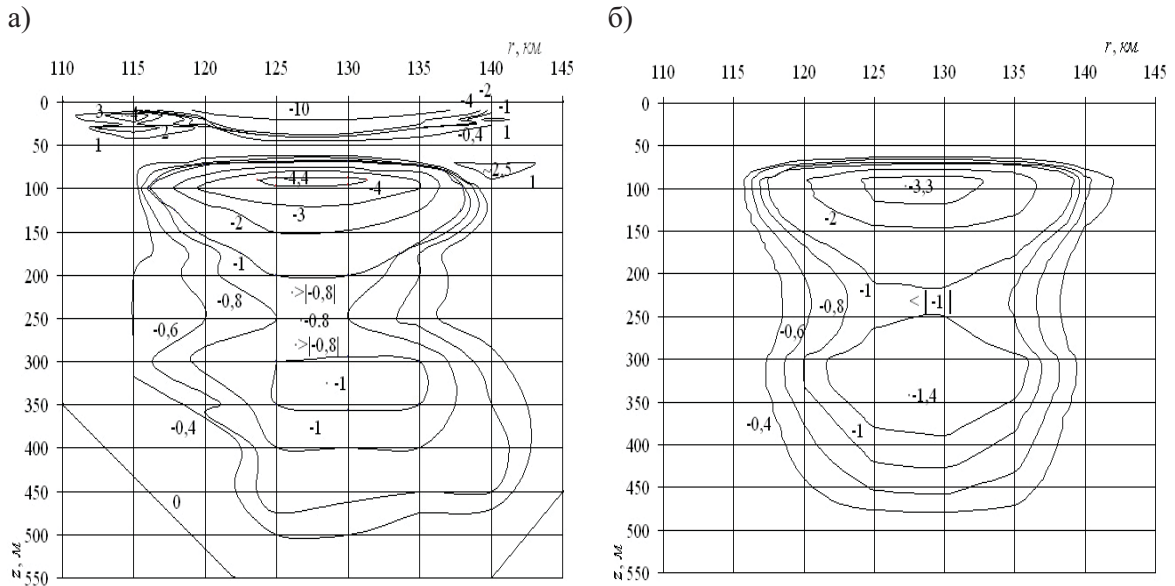


Рис. 1

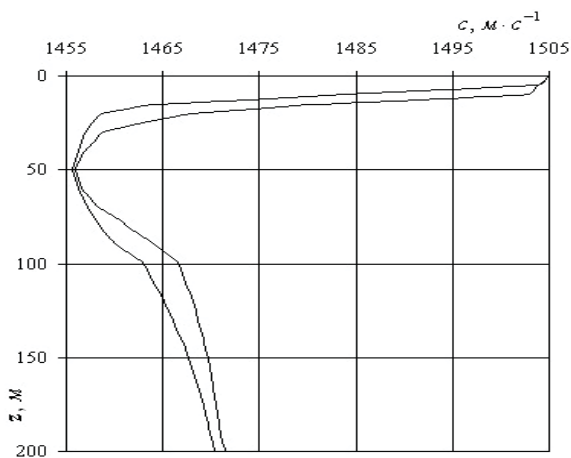


Рис. 2

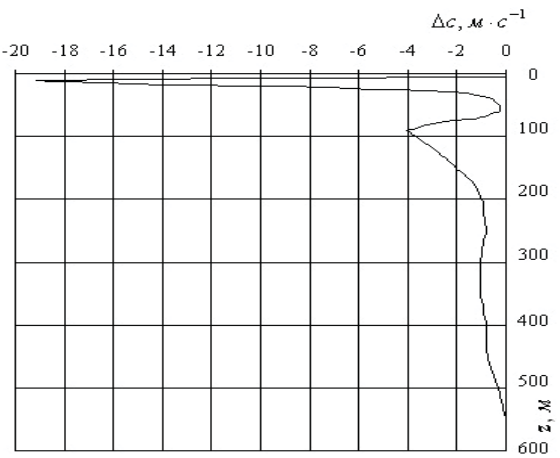


Рис. 3

Для восстановления поля могут использоваться только лучевые траектории, сигналы которых принимаются раздельно (на трассах протяженностью до 200 км) и для которых обеспечивается однозначность траекторно-временных соотношений [3]. Этим условиям, при вертикальных профилях скорости звука рис. 2, соответствуют лучи с глубинами нижних точек заворота  $z_m^H \geq 92$  м (и глубинами верхних точек  $z_m^6$  от 23 до 10 м). При восстановлении поля использовалось вертикальное (поперечное) и горизонтальное (продольное) сканирование вихря. Для вертикального сканирования использовались «пологие» лучи, глубины заворота которых лежат в области глубин вихря. А для горизонтального сканирования – «крутые», с максимальными глубинами заворота.

Процедура восстановления поля включает несколько этапов. На первом этапе определяется положение вихря на трассе зондирования и его горизонтальный размер  $L$ . На втором этапе определяются относительные величины усреднённого по вертикали горизонтального профиля аномалии скорости звука,  $\Delta c_{ср\ отн}(r)$ . На третьем этапе определяются вертикальные профили аномалии  $\Delta c(z_i)$  в выбранных сечениях вихря  $r_i$ . Определяется вертикальный размер неоднородности  $B$ . По вычисленным значениям  $\Delta c(r_i, z_i)$  строятся изолинии аномалии поля вихревого образования.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВИХРЯ И ЕГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РАЗМЕРА

Для определения положения вихря на трассе зондирования и его горизонтального размера используется несколько крутых лучей (с разными дальностями точек заворота). Необходимое для этого количество лучей обеспечивается за счет использования нескольких точек излучения и приема. Траектории с нулевой или малой (менее 10% максимального значения) величиной аномалии времени распространения, проходят вне неоднородности или по её границам и определяют её горизонтальный размер,  $L \approx 25$  км, и положение на трассе, от 115-го до 140-го километра (рис. 4).

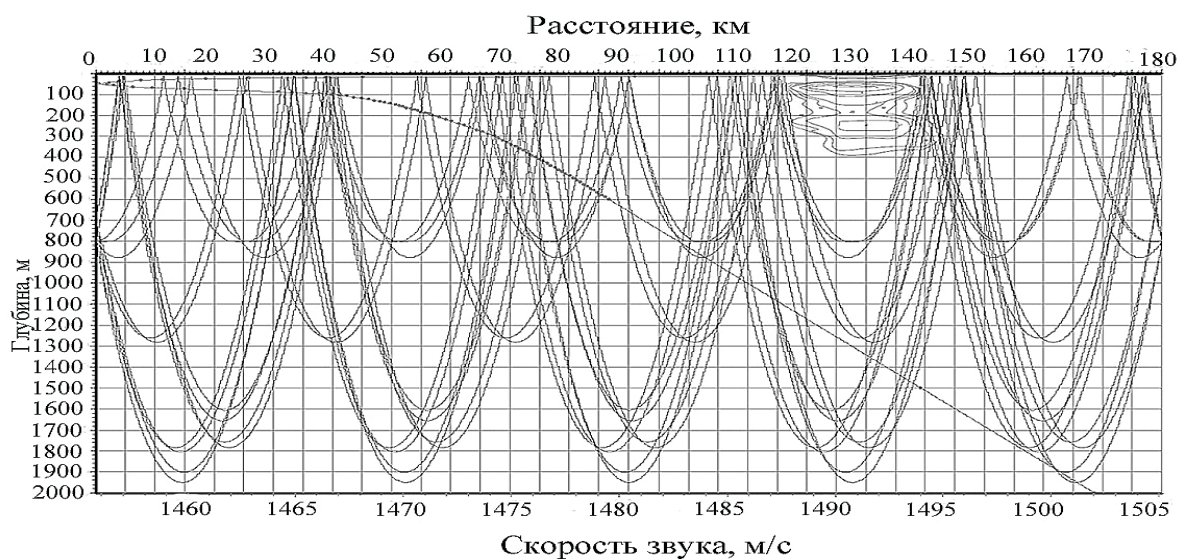


Рис. 4

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ АНОМАЛИИ

Для горизонтального сканирования неоднородности и определения усредненного по вертикали горизонтального профиля аномалии скорости звука можно использовать один крутой луч ( $z_m = 1830$  м), при продвижении точек излучения-приема вдоль трассы, либо несколько крутых лучей с разными дальностями верхних точек заворота при неподвижности излучателей и приемников, и измерение аномалий времен распространения  $\Delta T_m$ . Значения  $\Delta T_m(r)$  связаны с усредненными по вертикали значениями аномалии поля соотношением  $\Delta c_{cp}(r) = \Delta T_m(r) \cdot c_{cp}^2 / \Delta s$  ( $\Delta s$  – путь луча в области аномалии,  $\Delta s \ll L$ ) и позволяют найти относительные величины профиля аномалии,  $\Delta c_{cp\text{ оми}}(r) \sim \Delta T_m(r)$ , а при известных  $\Delta s$  и  $c_{cp}$  и абсолютные величины  $\Delta c_{cp}(r)$ . Положение луча относительно вихря определялось по положению верхних точек заворота опорных лучей относительно начала вихря,  $r_L$ . Полученная в случае одного луча зависимость  $\Delta T_m$  от  $r_L$  приведена на рис. 5. На этом же рисунке дана зависимость средних относительных величин горизонтального профиля аномалии  $\Delta c_{cp\text{ оми}}(r)$ .

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ АНОМАЛИИ

Для определения вертикальных профилей аномалии  $\Delta c(z_i)$  в выбранных сечениях вихря  $r_i$  использовались пологие лучи с глубинами заворота до нижней границы неоднородности. Для исключения ошибок восстановления, связанных с микромноголучевостью распространения, производилось усреднение времени по микролучам аномальных лучей  $\Gamma_m$  и расчетных восстанавливающих лучей  $\Gamma_m^*$ . Значения аномалии поля восстанавливались на глубинах точек заворота опорных лучей одновременно во всех шести сечениях вихря  $r_i$  и их величины задавались в соответствии с относительными значениями усредненного по вертикали горизонтального профиля аномалии  $\Delta c_{cp\text{ оми}}(r)$  (рис. 5). Восстановление начиналось с траектории, имевшей минимальный интервал глубин заворота,  $z_m^h = 92$  м и  $z_m^e = 23$  м, и продолжалось по траекториям с увеличивающимися значениями интервала глубин.

При практической реализации предлагаемой методики возникали определенные трудности, которые преодолевались за счет упрощающих допущений. Во-первых, из-за того, что время распространения по осевому лучу в рассматриваемых условиях (рис. 2) не является максимальным, его нельзя измерить экспериментально. А это не позволяет измерить аномалию поля на оси канала. Но природа вихрей такова, что аномалия их поля  $\Delta c$  в первую очередь связана с увеличением толщины холодного промежуточного слоя, ядро которого по глубине совпадает с осью канала. Так как минимальная температура в ядре практически не меняется, то с определённым приближением аномалию  $\Delta c$  на оси канала можно принимать равной нулю.

Во-вторых, начальная траектория, используемая для восстановления, занимает область глубин (от 23-х до 92-х метров), которая оказывается неразрешаемой при восстановлении аномалии поля. Можно было бы принять линейную интерполяцию в вертикальном профиле аномалии от оси канала до указанных глубин. Но характер изменений холодного

промежуточного слоя (в первую очередь определяющего аномалию скорости звука) является типичным для всех антициклонических вихрей. Поэтому характер аномалии в указанной области глубин, можно априори принимать неизменным, таким, как на рис. 3. В этой части профиля, в зависимости от интенсивности вихря, будет меняться только масштаб – значения аномалий на глубинах 23 и 92 метра.

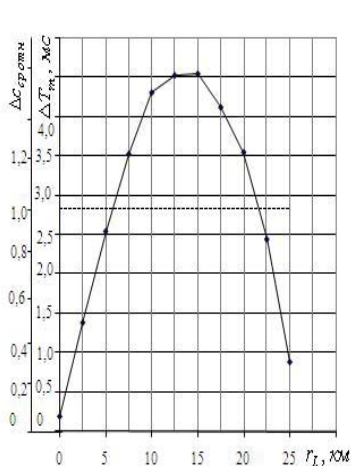


Рис. 5

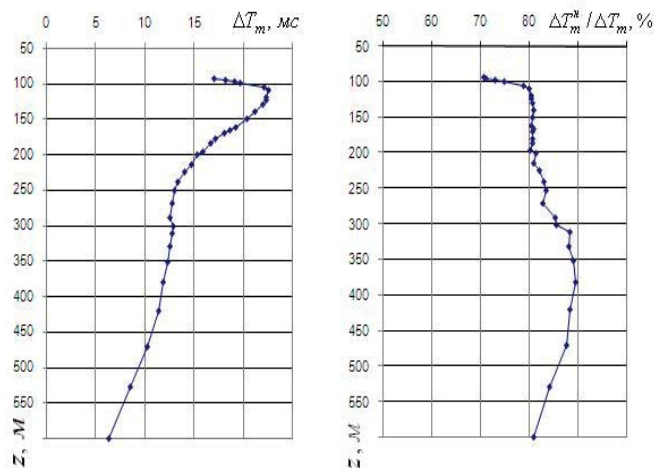


Рис. 6

В-третьих, в вихре аномалия поля существует как выше оси канала (верхнее ядро), так и ниже оси (нижнее ядро) и аномалия времени формируется как выше, так и ниже оси канала (верхние и нижние полуциклы траекторий –  $T_m = T_m^6 + T_m^H$ ). При этом разделить вклад аномалий поля выше и ниже оси канала в формирование общей аномалии времени распространения по лучу весьма сложно. А без знания соотношения аномалий времен, формируемых выше и ниже оси канала, восстановление вертикального профиля аномалии поля проблематично. Проведенные расчеты лучевого распространения в условиях аномального поля без верхнего ядра позволили определить вклад нижнего ядра,  $\Delta T_m^H$ , в общую аномалию времени распространения,  $T_m$ , для траекторий с разными глубинами заворота (рис. 6). Учитывая типовую структуру вихревого образования и типовой характер профиля аномалии  $\Delta c(z)$ , в среднем сечении вихря (рис. 3) с определённым приближением можно также полагать типовой для всех антициклонических вихрей и зависимость от глубины заворота вклада аномалии поля нижнего ядра в общую аномалию времени распространения (рис. 6). Пользуясь этой зависимостью, можно по аномалии времени  $\Delta T_m$  вычислять составляющие аномалии  $\Delta T_m^6$  и  $\Delta T_m^H$ , связанные с верхними и нижними ядрами, по аномалии  $\Delta T_m^H$  в режиме «без верхнего ядра» восстанавливать нижние (ниже оси канала) ветви профиля  $\Delta c(z_i)$ , а затем в режиме полной аномалии и известных нижних ветвей профиля восстанавливать их верхние части.

Восстановление нижних ветвей профилей производилось по указанной выше методике. При восстановлении верхних ветвей профилей использовались уже вычисленные значения нижних ветвей и те же траектории, что использовались для вычислений этих значений. Приписывая точкам верхней ветви профиля значения

скорості звука точок нижньої ветви расчетно-подборним путем находили глубины этих точек, при которых расчетные значения аномалии времени распространения по рассматриваемым лучам соответствовали фактическим. Далее, по найденным глубинам точек профиля и по известному исходному неаномальному профилю  $c_0(z)$  (рис. 2) определялись значения аномалии на этих глубинах  $\Delta c(z_m^e) = c(z_m^e) - c_0(z_m^e)$ .

Указанный подход позволяет восстановить аномальные профили вниз (от оси канала) до нижней границы вихря,  $z \sim 500$  м, и вверх до глубины верхней точки заворота траектории,  $z = z_m^e \sim 17$  м, у которой  $z_m^h \sim 500$  м. Для восстановления профилей  $\Delta c(z)$  в области глубин  $z < 17$  м необходимо использовать траектории с глубинами заворота  $z_m^h > 500$  м и  $z_m^e < 17$  м. При найденной аномалии поля в области глубин  $z > 17$  м численным интегрированием по лучу находится часть аномалии  $\Delta T$ , соответствующая аномалии  $\Delta c$  в этой области глубин. При этом другая часть  $\Delta T$  определяется аномалией  $\Delta c$  в области глубин  $z < 17$  м. Так же, как рассматривалось выше, задавая  $c = c(z_m^h) = c(z_m^e)$ , находится  $z_m^e$  и соответствующее ему  $\Delta c(z_m^e)$ . Расчёты проводятся до максимальной глубины заворота луча  $z_m^h = 1950$  м и ей соответствующей минимальной глубины  $z_m^e = 9$  м.

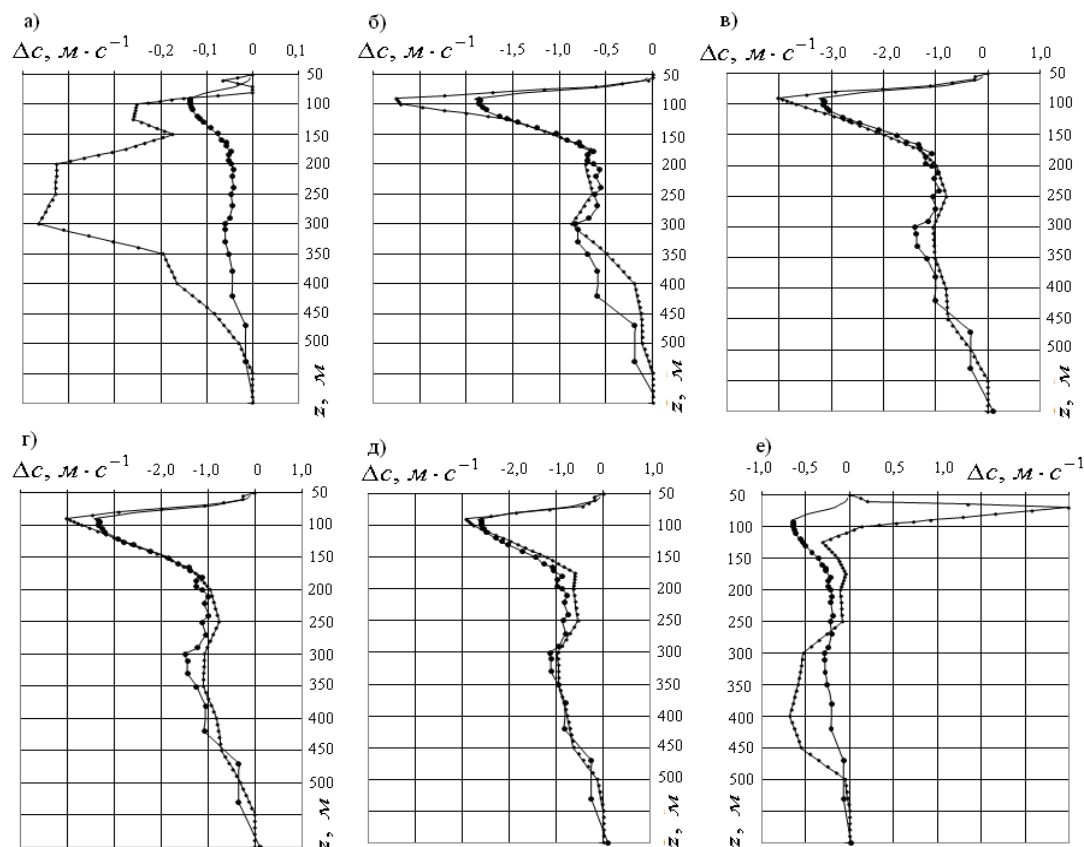


Рис.7

Полученные по этой методике вертикальные профили аномалии  $\Delta c(z_i)$  в шести сечениях вихря  $r_i$  приведены на рис. 7 (• – восстановленные, • – фактические). Из этих профилей, руководствуясь условием  $\Delta c_{cp} = \Delta c_{\min} = 0,1\Delta c_{\max}^H = 0,35$  м/с (где  $\Delta c_{\max}^H$  – максимальное значение аномалии в нижнем ядре) можно определить нижнюю границу вихря и его вертикальный размер  $B \approx 500$  м. Построенные по данным этих профилей изолинии аномалии поля  $\Delta c(r, z)$  вихревого образования представлены на рис. 1 б. Восстановленная таким образом аномалия поля вихря (рис. 1 б) в значительной степени совпадает с фактической аномалией поля этого вихря (рис. 1 а). Отличия полей аномалии (рис. 1 а и 1 б) в первую очередь определяются зеркальной асимметрией поля (профили, рис. 7 а и 7 е) и могут быть уменьшены при расчетах с использованием «косых» лучей (с глубинами заворота от 500 до 1000 м), пересекающих вихрь по диагонали.

## ВЫВОДЫ

Предложенная методика на основе использования пологих и крутых неаномальных лучей позволяет эффективно восстанавливать поля аномалии скорости звука вихревых образований с горизонтальными размерами до 35 км. Причём уже на первом этапе точность восстановления оказывается достаточно высокой. Эту точность можно повысить на последующих этапах, используя восстановленное на предыдущем этапе поле в качестве исходного для последующего восстановления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. W. Munk, C. Wunsch. Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring // Deep-Sea Res. – 1978. – 26А. – P.123–161.
2. Гончаров В.В., Куртепов В.М. Успехи и проблемы акустической томографии океана // Акустические волны в океане / Под ред. Бреховских Л.М., Андреевой И.Б. – М.: Наука, 1987. – С. 15–24.
3. Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. О возможностях акустического лучевого зондирования неоднородностей морской среды // Консонанс-2005. Акустичний симпозіум 27-29 вересня 2005 р.: Зб. праць – Київ: Ін-т гідромеханіки. – 2005. – С. 90-96.
4. Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. Акустический мониторинг неоднородностей среды и точность восстановления аномалии поля // Консонанс-2009. Акустичний симпозіум 29 вересня – 1 жовтня 2009 р., настоящий выпуск.
5. Блатов А.С., Иванов В.А. О вихреобразовании в Черном море // Комплексные исследования Черного моря. – Севастополь, МГИ. – 1979. – С. 43–51.