

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ ЗВУКА ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ЛУЧЕВОМ ЗОНДИРОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ЭФФЕКТА СДВИГА ТЕРМОКЛИНА

В. К. БОГУШЕВИЧ, Н. С. НИКОНЮК, М. И. СКИПА

Отделение гидроакустики МГИ НАН Украины, г. Одесса

Рассматриваются вопросы восстановления профилей скорости звука при сдвиге велоклина в условиях неопределенности участка профиля от оси канала до нижней границы клина.

ВВЕДЕНИЕ

Акустический мониторинг, использующий распространяющийся звук, позволяет восстанавливать поля скорости звука прозвучиваемых пространств и оценивать многие явления и процессы в океане. При лучевом подходе к решению задачи восстановления в качестве измеряемых величин берутся времена T_m распространения сигналов по лучам Γ_m , (путь s) в аномальном поле скорости звука $c = c_o + \Delta c$, которые сравниваются с временами T_m^o по лучам Γ_m^o в опорном поле $c = c_o(x, y, z)$. Аномалия поля $\Delta c(x, y, z, t)$, восстанавливается по совокупности аномалий времён сигналов лучей ΔT_m ,

$$\Delta T_m = T_m - T_m^o = \int_{\Gamma_m} (c_o + \Delta c)^{-1} ds - \int_{\Gamma_m^o} c_o^{-1} ds, \quad m = 1, \dots, M, \quad (1)$$

Задача инверсии (1) очень сложна, она нелинейна. Поэтому обычно ее упрощают путем линеаризации. Принимая $\Delta c/c_o \ll 1$, заменяя аномальные траектории Γ_m на опорные Γ_m^o и полагая малость их отличия и малость связанного с этим отличия времён $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^o)$ получают приближённо, в линеаризованном по Δc виде, выражение [1, 2]:

$$\Delta T_m \approx - \int_{\Gamma_m^o} c_o^{-2} \Delta c ds, \quad m = 1, \dots, M. \quad (2)$$

Ошибка вычислений согласно (2) в первую очередь определяется разницей времён $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^o)$. Эта разница и определяет точность восстановления поля и саму возможность применения линейной инверсии – требование $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^o) \ll \Delta T_m$. Однако последнее требование выполняется не всегда. Его выполнение зависит от множества условий [2]. В значительной степени величина $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^o)$ зависит и от сдвига термоклина (велоклина).

Сдвиг глубин велоклина играет большую роль в формировании аномалий времени сигналов лучей в ряде важных задач восстановления полей неоднородностей – вихревых образований, внутритермоклинных линз, опускания термоклина в потоке ОЧТ и др. В условиях Чёрного моря эта роль намного больше чем в океане, что значительно усложняет решение задач инверсии. Сдвиг велоклина, как одно из проявлений аномалии поля, представляет собой особый случай в задачах инверсии. При сдвиге велоклина теряется однозначная связь между величинами аномалии поля, сдвига глубин клина, формой луча и его аномалией времени. В случаях, когда в общей аномалии времени ΔT_m

преобладает составляющая, связанная с различием траекторий, $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^o)$, определяемая в первую очередь отличием глубины их верхних точек заворота Δz_m^+ , для восстановления поля не применима линейная инверсия (2), использующая зависимость Δc от ΔT_m [3].

В условиях не применимости линейной инверсии $\Delta T_m \rightarrow \Delta h$ необходимы другие решения задачи инверсии. Составной частью этой задачи является проблема невозможности восстановления начальных участков реальных профилей, от оси канала до нижней границы велоклина. Решение задачи восстановления профилей скорости звука при акустическом лучевом зондировании в условиях эффекта сдвига велоклина при неопределенности начального участка профиля и является целью данной работы.

1. ВОПРОСЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СДВИГА КЛИНА

Принято считать [1], что аномалия времени по лучу в первую очередь определяется интегрированием аномалии поля по этому лучу (изменением скорости вдоль невозмущённой траектории Γ_m^o), и только во вторую очередь зависит от отличия аномального Γ_m и опорного Γ_m^o лучей (смещения самой траектории). Но в случаях сдвига велоклина это может оказаться не так и именно отличие траекторий Γ_m и Γ_m^o будет в первую очередь определять аномалию времени ΔT_m для многих лучей. Численное моделирование показало, что в Чёрном море в случаях вихревых образований и, особенно, внутритермоклинных линз и сдвига термоклина в ОЧТ, аномалия времён распространения в первую очередь формируется за счёт изменения глубин верхних точек заворота лучей. При этом большая часть аномалии времени по лучам определялась не аномалией поля, а сдвигом их верхних точек заворота, изменением формы луча:

$$\Delta t_1 = \int_{\Gamma_m^o} c_0^{-2} \Delta c ds \approx \Delta t_2 = \Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^o); \quad \Delta T_m = \Delta t_1 + \Delta t_2. \quad (3)$$

В случаях, когда в общей аномалии времени ΔT_m преобладает составляющая, связанная с различием аномального и опорного лучей, с отличием глубин их верхних точек заворота, для решения задачи инверсии предлагается использовать зависимость ΔT_m не от аномалии поля Δc , а от сдвига велоклина Δz , сдвига по глубине точек аномального профиля [3]. Идея подхода заключается в том, что в качестве основного фактора, определяющего аномалию времени ΔT_m , рассматривается изменение глубины верхней точки заворота аномального луча Δz_m^+ и соответствующее изменение длины его пути в области глубин от оси канала до велоклина. При этом связанные с изменениями Δz_m^+ изменения формы луча и глубины его нижней точки заворота рассматриваются, в смысле влияния на аномалию времени ΔT_m , как факторы второго порядка малости.

Для плоскопараллельного сдвига велоклина и идеализированных аномального и опорного профилей нами получено выражение для аномалии времени луча

$$\Delta t \approx -2\Delta z \cdot \sin(\chi_{ia}^o - \Delta \chi / 2) / c_{ia}. \quad (4)$$

Если профили идеализированы, но имеют переходные области к нижним границам велоклинов, то аномалия времени будет определяться как сдвигом клина Δz , так и интегрированием аномалии поля по лучам, $\Delta T_m = \Delta t_2 + \Delta t_1$. Составляющую Δt_1 можно найти «интегрированием по лучам» изменений скорости звука в переходных областях:

$$\Delta t_1 = \int_{\Gamma_m^a, z_c}^{z_{ia}^a} c(z)^{-2} [c(z) - c_c] ds - \int_{\Gamma_m^o, z_c}^{z_{ia}^o} c(z)^{-2} [c(z) - c_c] ds. \quad (5)$$

Если градиенты скорости звука в аномальном и опорном велоклинах различны, $g_a \neq g_o$, и сдвиг по глубине нижней границы клина не нулевой, $\Delta z_{ia} \neq 0$, то аномалия времени луча будет определяться двумя составляющими – плоскопараллельным сдвигом велоклина и разным наклоном велоклинов, разным значением их градиентов:

$$\Delta t = -\{2\Delta z_{ia} \cdot \sin[(\chi_{ia}^a + \chi_{ia}^o)/2] + 2(\Delta z_m^+ - \Delta z_{ia}^-) \cdot \sin[(\chi_{ia}^a + \chi_{ia}^o)/3]\} / c_{ia}. \quad (6)$$

Формулы (4 – 6) в случаях линейной идеализации велоклинов, обеспечивают высокую точность расчетов как для идеализированных, так и для реальных профилей Чёрного моря. С некоторым приближением, $\chi_i \approx \chi_a$, $\sin \chi \approx \chi$, выражение (6) можно представить:

$$\Delta t \approx -[2\Delta z \cdot \sin \chi_{ia} - 2(\Delta z - \Delta z_m^+) \cdot \sin(2\chi_{ia} / 3)] / c_{ia} \approx -[2(\Delta z / 3 + 2\Delta z_m / 3) \sin \chi_{ia}] / c_{ia}, \quad (7)$$

Тогда, для пологих, $\Delta z_m^+ \approx \Delta z_{ia}^-$, и крутых, $\Delta z_m^+ \approx \Delta z_{aa}$, лучей будем иметь:

$$\Delta z_{ia} \approx -\Delta t c_{ia} / 2 \sin \chi_{ia}; \quad (8)$$

$$\Delta z_{aa} \approx [(-3\Delta t \cdot c_{ia} / 2 \sin \chi_{ia}) - \Delta z_{ia}] / 2. \quad (9)$$

Приведенные формулы можно использовать для восстановления идеализированных и реальных профилей скорости звука при сдвиге велоклина.

Восстановление профилей. На первом этапе восстановления находится первый расчетный (восстановленный) профиль, который в зависимости от характера опорного профиля и аномалии может быть или прямой, определяемой через Δz_{ia} и Δz_{aa} по формулам (8) и (9), или кривой, определяемой по аномалиям времен сигналов лучей,

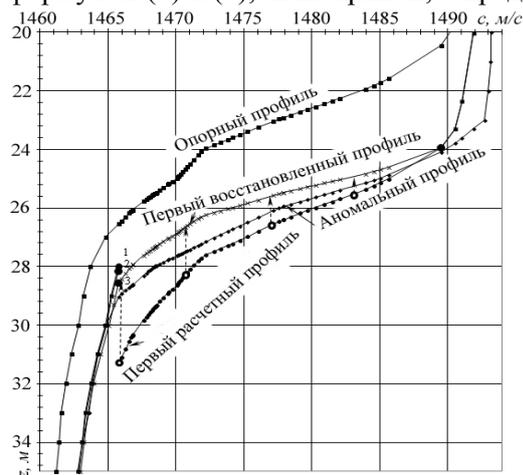


Рис. 1. Опорный, аномальный и восстановленный профили

пересчитывается в разницу глубин, $\delta \Delta z_{pi}(c) = -\delta \Delta t_i \cdot c_{ia}^a / 2 \sin \chi_{ia}^a$, полученная разница $\delta \Delta z_{pi}(c)$ (восстанавливающая функция) прибавляется к значениям глубин предыдущего

$$\Delta z_{pi}(c) = \Delta t_i \cdot c_{ia}^a / 2 \sin \chi_{ia}^a, \text{ в виде сдвигов точек}$$

расчетного профиля относительно опорного [3].

В последнем случае первый расчетный профиль из-за завышений расчетных значений Δz_{pi} в

области нижней границы клина нужно сопрягать с начальным участком профиля [3],

рис. 1. На втором этапе восстановления уточняется (методом подбора, соответствия Δz

и Δt) положение нескольких начальных точек восстанавливаемого профиля. На третьем этапе

выполняется процесс последовательных приближений и точного восстановления: определяется аномалия времени по лучам для

восстанавливаемого и аномального профилей, $\delta \Delta t_i = (T_{pi} - T_{ai}) / N_{\delta}$, эта аномалия

пересчитывается в разницу глубин, $\delta \Delta z_{pi}(c) = -\delta \Delta t_i \cdot c_{ia}^a / 2 \sin \chi_{ia}^a$, полученная разница

$\delta \Delta z_{pi}(c)$ (восстанавливающая функция) прибавляется к значениям глубин предыдущего

расчётного профиля, получается следующий профиль и делается следующий расчёт $\delta\Delta t_i$ и $\delta\Delta z_i$. И так до получения необходимой по $\delta\Delta t_i$ точности восстановления.

2. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ НАЧАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ ПРОФИЛЕЙ

Предложенная методика позволяет восстанавливать аномальные профили при сдвиге велоклина в условиях постоянного по трассе волновода. Эту же методику можно использовать и для восстановления полей в условиях переменного по трассе волновода. Но в ряде случаев реальных профилей возникают проблемы с ее применением – невозможность восстановления участка профиля, от оси канала до нижней границы клина. Эту проблему можно решить предварительным заданием этого начального участка на основании каких-либо физических или статистических данных и проведением сравнительных расчетов по нескольким исходным моделям. Для этого в [3] было предложено задавать несколько начальных участков, обеспечивающих необходимую аномалию времени самому пологому лучу, $\Delta z_m^+ \approx \Delta z_{ia}^-$, с $N_o = \max$. Различие начальных участков при неизменных ΔT_m приводит к различию восстанавливаемых участков профилей в области глубин клина. При этом возникает задача оценки различия этих восстановленных участков и выбора из них наиболее правдоподобного варианта.

Восстановление профилей при неопределенности их начальных участков. Для оценки различия восстановленных участков профиля при различных начальных участках

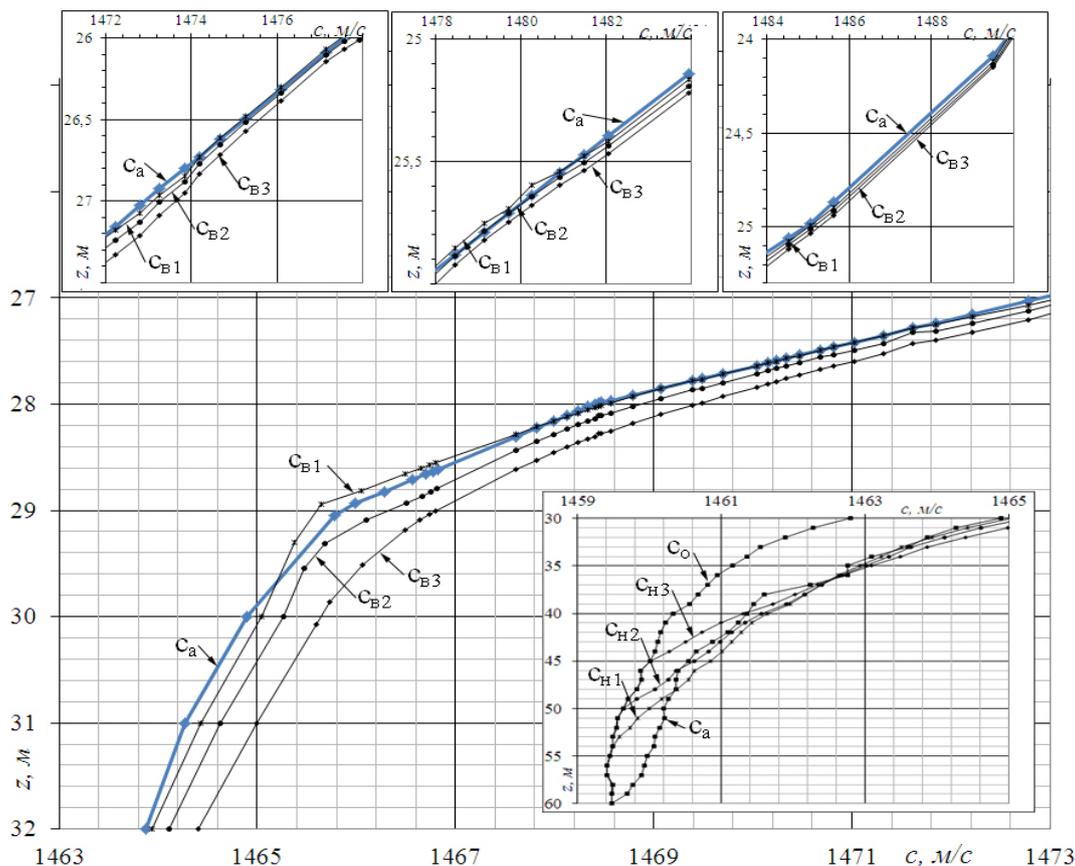


Рис. 2 Аномальный c_a и восстановленные c_{B1} , c_{B2} , c_{B3} профили, их начальные участки c_{H1} , c_{H2} , c_{H3}

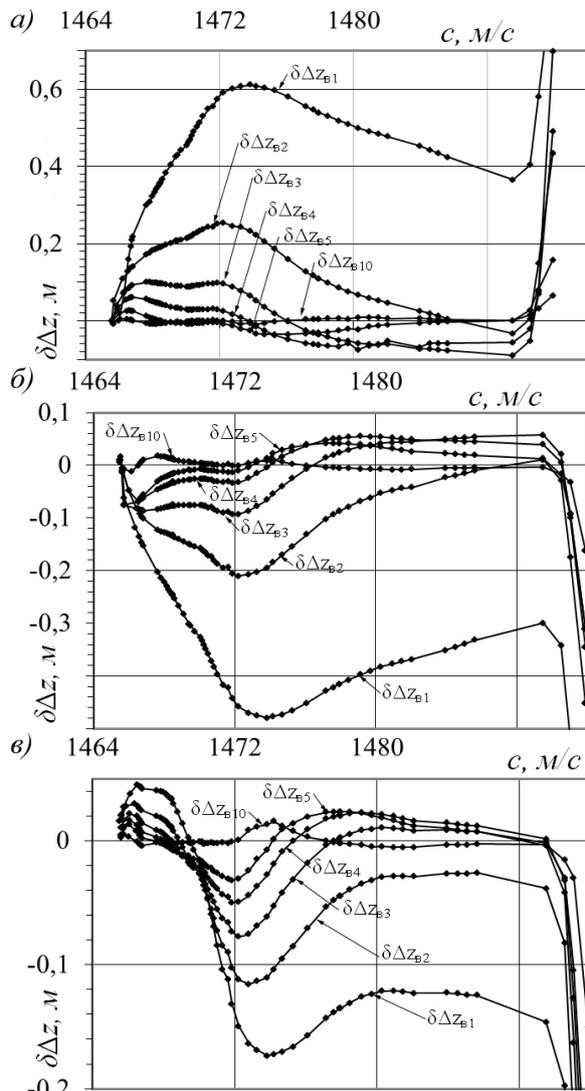


Рис. 3. Восстанавливающие функции, расчеты по начальным участкам профиля c_{n1} (а), c_{n2} (б), c_{n3} (в)

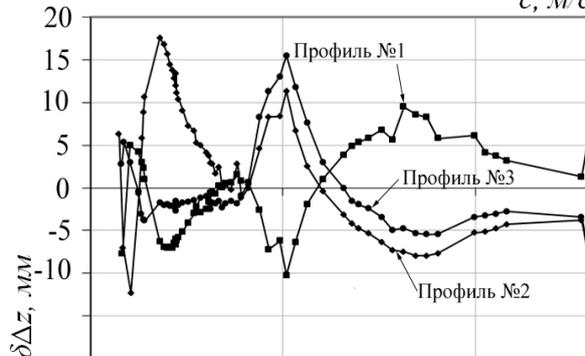


Рис. 4. Восстанавливающие функции, 10-е приближение

профиля, их отличий от фактического аномального профиля и выбора из них наиболее правдоподобного варианта были проведены расчеты. В расчетах использовались реальные профили осеннего разреза, полученные в 18-м рейсе НИС «Трепанг», рис. 1 [3]. Расчеты по указанным профилям показали, что однозначность траекторно-временных соотношений, возможность раздельного приема сигналов и идентификация обеспечивается для лучей с числом циклов $N_{\sigma} \leq 50$ ($r = 150$ км), т.е. для лучей, верхние точки заворота которых находятся на велоклине, вплоть до самой его нижней границы (рис. 1). При этом для восстановления использовались лучи с числом циклов $N_{\sigma} = 50 - 4,6$.

Для восстановления профиля в области глубин велоклина нужно было задать его начальный, от оси канала до нижней границы клина, не восстанавливаемый участок. Для этого были рассчитаны три варианта начальных участков профилей, получаемых из опорного профиля, с разными глубинами начальных точек и разными, но постоянными градиентами скорости звука, которые обеспечивали нужное значение аномалии времени, $\delta \Delta \dot{O} = 0$, для первого расчетного луча, $N_{\sigma} = 50$ (рис. 2).

Результаты восстановления профиля в области велоклина по трем начальным участкам и восстанавливающие функции приведены на рис. 2–3. Характер кривых для трех вариантов расчета сходен. Для всех трех расчетов сходимость процесса восстановления (уменьшение ошибки восстановления) примерно одинакова, о чем говорит близость амплитуд восстанавливающих функций (рис. 4). Сами восстановленные профили, рис. 2, несколько отличаются в области нижней

границы велоклина (в соответствии с отличиями конечных точек начальных участков

профилей); с уменьшением глубины, к верхней границе велоклина, эти отличия уменьшаются. В четырех областях восстановленного профиля (со значениями скорости звука 1466–1472, 1472–1478, 1478–1484 и 1484–1490 м/с), отличия рассчитанных значений глубины от фактического аномального профиля составляли 60–18 см, 18–8 см, 8–9 см и 9–7 см. Такие отличия, кроме области нижней границы велоклина, можно считать незначительными и вполне приемлемыми для задач восстановления полей.

Расчеты показали, что точность восстановления профиля на всех его участках, кроме области нижней границы клина, оказывается высокой, несмотря на значительные отличия начальных участков профиля. Это объясняется тем, что при малости аномалии скорости звука в области глубин от оси канала до нижней границы клина аномалия времени, связанная с «интегрированием по лучам», мала для всех лучей, кроме пологих, завораживающих в области нижней границы клина. Поэтому для всех лучей, кроме пологих, влияние начального участка профиля на аномалию времени луча будет мало.

Точность восстановления в области нижней границы клина желательно повысить. При этом возникает задача выбора из нескольких рассчитанных профилей одного, наиболее соответствующего фактическому, аномальному. Формально все три рассчитанные профиля равноправны и в соответствии с заданными начальными участками их точки соответствуют последовательности аномалий времен сигналов лучей. Выбрать из нескольких восстановленных профилей один, более соответствующий фактическому и обеспечивающий меньшую ошибку восстановления, можно, если учитывать характер изменения скорости звука в области нижней границы велоклина, характер «излома» профиля. При этом можно ориентироваться на характер «излома» в опорном профиле. При таком подходе наиболее «соответствующими» будут восстановленные профили №1 и №2, обеспечивающие существенно меньшие, по сравнению с указанными выше, значения ошибок восстановления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод восстановления профилей скорости звука при акустическом лучевом зондировании в условиях сдвига велоклина и неопределенности начального участка профиля. Дано математическое обоснование применимости метода.

Численное моделирование показало хорошую точность восстановления для большей части профиля и малое влияние задаваемого начального участка профиля на результаты расчетов. Лучшую точность восстановления в области нижней границы велоклина можно получить при выборе более “правдоподобного” варианта расчета, учитывающего характер “излома” профиля в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Munk W. and Wunsch C.* Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring // *Deep-Sea Res.* – 1979. – 26. – P. 123 – 161.
2. *Гончаров В. В., Зайцев В. Ю., Куртенов В. М., Нечаев А. Г., Хилько А. И.* Акустическая томография океана – Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997. – 254 с.
3. *Богушевич В. К., Никонюк Н. С., Скипа М. И.* Восстановление полей неоднородностей морской среды при акустическом лучевом зондировании в условиях эффекта сдвига термоклина // *Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр.* – Севастополь: МГИ НАН Украины – 2012. – Вып. 18. – С. 15–24.