

В.К.Богушевич, Л.Н.Замаренова, Н.С.Никонюк, М.И.Скипа

*Отделение гидроакустики**Морского гидрофизического института НАН Украины, г. Одесса*

**О ВОЗМОЖНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ ЭФФЕКТА
СДВИГА ТЕРМОКЛИНА. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Рассматриваются вопросы восстановления аномалии поля неоднородности методом инверсии аномалий времени лучей в вертикальные сдвиги точек профилей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *акустический мониторинг, сдвиг термоклина, восстановление поля, аномалия времени лучей, инверсия.*

Дистанционные методы наблюдения, использующие прозвучивание (распространяющийся звук), обеспечивают возможность контроля морской среды и на больших расстояниях и на больших глубинах. Акустический мониторинг позволяет восстанавливать поля скорости звука прозвучиваемых пространств, что обеспечивает оценивание явлений и процессов в океане. При лучевом подходе к решению задачи восстановления поля в качестве измеряемых величин берутся времена T_m распространения сигналов по лучам Γ_m , которые несут информацию о неоднородностях среды, встретившихся на пути. Эти времена распространения по лучам Γ_m в аномальном поле скорости звука $c(x, y, z, t) = c_0 + \Delta c$ сравниваются с временами T_m^0 по лучам Γ_m^0 в опорном поле $c_0(x, y, z)$. Аномалия поля $\Delta c(x, y, z, t)$, восстанавливается по совокупности аномалий времён сигналов лучей $\Delta T_m = T_m - T_m^0$ [1, 2].

Задача инверсии $\Delta T_m \rightarrow \Delta c(x, y, z, t)$ очень сложна и ее упрощают путем линеаризации. При линейной инверсии аномальные траектории Γ_m заменяют на опорные Γ_m^0 и, полагая малость их отличия и малость отличия времен $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^0)$, получают приближенное, в линеаризованном по Δc виде, выражение $\Delta T_m \approx - \int_{c_0}^{-2} \Delta c ds$ [1, 2]. Ошибка вычисления согласно этим уравнениям в первую очередь определяется отличием траекторий Γ_m и Γ_m^0 и разницей времён $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^0)$. Эта разница и определяет точность восстановления поля и саму возможность применения линейной инверсии – требование $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^0) \ll \Delta T_m$. Но это требование выполняется не всегда. Его выполнение зависит от многих условий [2]. В значительной степени величина $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^0)$ зависит от эффекта сдвига термоклина (велоклина).

Существует ряд неоднородностей среды, которые не только исключают возможность применения линейной инверсии для восстановления их поля, но и крайне осложняют саму возможность такого восстановления. Такими являются неоднородности, у которых аномалия выражается в изменениях глубины слоёв с высокими значениями градиента скорости звука (температуры) – велоклина (термоклина). В Чёрном море это вихревые образования, внутритермоклинные линзы и опускание тёплых вод в потоке ОЧТ. Вертикальный сдвиг велоклина, как одна из форм проявления аномалии поля ско-

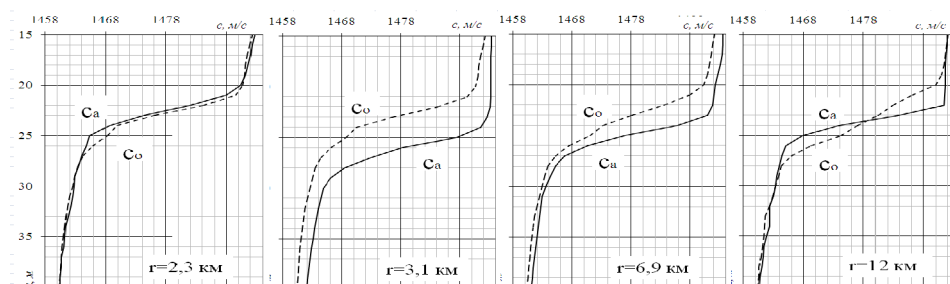
рости звука, представляет собой особый случай в задачах инверсии, когда теряется однозначная связь между величинами аномалии поля, сдвига глубины клина, формой луча и его аномалией времени. В случаях, когда в общей аномалии времени ΔT_m преобладает составляющая, связанная с различием траекторий аномального и опорного лучей $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^o)$, определяемая в первую очередь отличием глубин их верхних точек заворота Δz_m^+ , для восстановления поля не применима линейная инверсия, использующая зависимость Δc от ΔT_m [3].

Для решения задачи инверсии и восстановления профилей в случаях сдвига велоклина было предложено использовать зависимость аномалии времени ΔT_m не от аномалии поля Δc , а от сдвига клина Δz , – сдвига по глубине точек аномального и опорного профилей скорости звука, имеющих одни и те же значения скорости. Были определены зависимости ΔT_m от Δz_m^+ и предложена методика восстановления профилей [3]. Эта методика позволила восстановить аномальные профили при сдвиге термоклина в потоке ОЧТ в условиях постоянного по трассе волновода [3]. Эту же методику можно использовать и в условиях малоизменяющегося по трассе волновода. Но в случаях неоднородностей с большой горизонтальной изменчивостью аномалии поля применимость метода инверсии $\Delta T \rightarrow \Delta z$ оказывается под вопросом. Возможности применения предложенной методики восстановления аномальных профилей для восстановления аномалий полей неоднородностей рассматривались в [4]. Но ограниченность числа лучей, используемых для восстановления, и характер аномалии поля неоднородности (небольшие значения горизонтального градиента) не позволили в должной степени рассмотреть этот вопрос.

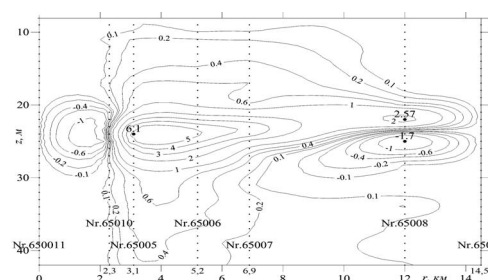
Целью работы является оценка применимости метода инверсии аномалий времени в вертикальные сдвиги точек аномальных профилей для восстановления аномалий поля неоднородностей в переменном по трассе волноводе. Задача решается методом численного моделирования лучевой и временной структуры в опорном и аномальном поле в переменных по трассе волноводах. Для решаемой задачи выбрана неоднородность с большими горизонтальными градиентами аномалии – поле температуры в потоке ОЧТ для осеннего разреза с горизонтальным размером $L = 14,5$ км, – восстановление которой не очень успешно решалось методами линейной инверсии [5]. Профили скорости звука в сечениях неоднородности показаны на рис.1, изолинии аномалии поля температуры – на рис.2.

Основные положения восстановления профилей методом сдвига.

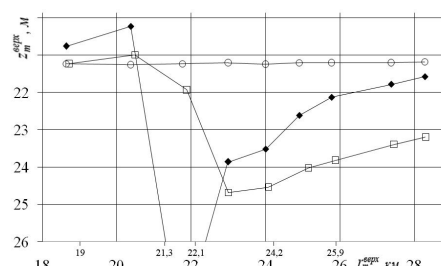
Для восстановления изменения глубин велоклина неоднородности при акустическом лучевом зондировании нужно обеспечить ее сканирование лучами, верхние точки заворота которых $ВТЗ^+$ распределены по ее длине L и по интервалу глубин клина. Чем больше этих точек, тем с большей точностью можно восстановить вертикальные сдвиги клина, профили скорости звука в сечениях неоднородности и аномалию ее поля. Для этого можно использовать достаточно крутые лучи с длинами циклов, большими горизонтального размера неоднородности, $D_u > L$. При таком подходе можно восстановить сдвиги глубин Δz в верхней и средней части клина. Сдвиг Δz в нижней части клина восстановить непосредственно по аномалиям времён лучей не представ-



Р и с . 1 . Профили скорости звука аномальные, опорные в сечениях неоднородности.



Р и с . 2 . Изолинии аномалии поля температуры, НИС «Трепанг», 12.10 1997 г.



Р и с . 3 . ВТЗ лучей: опорные (○), аномальные (□) и расчетные (♦).

ляется возможным, как из-за малости длин циклов, $D_{\eta} < L$, так и из-за траекторно-временной неоднозначности [5]. Решить задачу восстановления в этом интервале глубин клина можно по восстановленной его верхней и средней части и по горизонтальному разрезу аномалии, полученному при горизонтальном сканировании неоднородности лучами, отражающимися от поверхности [4]. В результате можно получить оценочное значение поля аномалии во всём интервале глубин и дальностей.

Возможности восстановления на «длинной» трассе. Обеспечить большое число сканирующих лучей, имеющих ВТЗ⁺ во всём интервале дальностей и глубин неоднородности, на трассах большой протяжённости можно при использовании нескольких точек излучения и (или) приёма. При нахождении неоднородности на трассе длиной $r = 170$ км в интервале дальностей от $r_n = 19,0$ км до $r_k = 33,5$ км ($L = 14,5$ км) высокое пространственное разрешение при восстановлении обеспечивается при трёх точках излучения, $z_u = 350, 750$ и 1000 м, и пяти точках приёма, $z_{np} = 200, 500, 700, 900$ и 1100 м. Положение некоторых ВТЗ⁺ опорных и аномальных лучей для верхней части клина и рассчитанные по аномалиям времени ΔT_m вертикальные сдвиги Δz приведены на рис.3. Слева от зоны гидрофронта, $r < 21$ км (рис.2, 3), рассчитанные значения Δz превышают фактические, справа от зоны, $r > 22,2$ км – меньше фактических. Аномальный луч, заворачивающий в зоне гидрофронта ($r = 21,9$ км, рис.2), имея прогнозируемое положение ВТЗ⁺, имеет крайне высокие значения аномалии ΔT_m и сдвига Δz . Результат объясняется значительными изменениями формы луча (χ_o, D_{η}, z_m) и времени распространения по лучу Δt_a после верхней точки заворота в аномальной области – уменьшением ВТЗ⁺ с 22 м до 14,5 м и увеличением пути луча в высокоскоростном слое (рис.4).

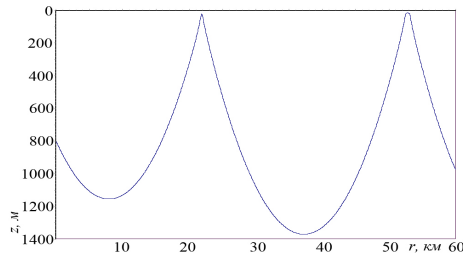


Рис. 4. Изменение формы луча после аномальной точки заворота

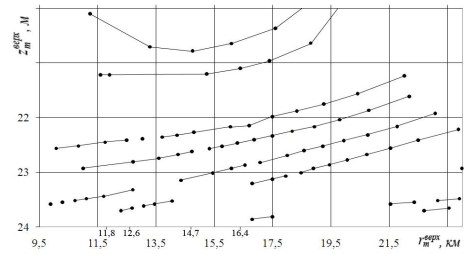


Рис. 5. Верхние точки заворота сканирующих лучей

При принятой методике инверсии $\Delta T_m \rightarrow \Delta t \rightarrow \Delta z$ [3], предполагающей многократность последовательных приближений $\delta \Delta t \rightarrow \delta \Delta z$ и сведение «к нулю» ошибки Δt , отличие фактических значений ΔT_m от значений Δt , определяемых вертикальным сдвигом Δz , их завышение или занижение, не влияет на результат восстановления, а только меняет число приближений. Если, конечно, аномалия ΔT_m не меняет знак, и не возникают нетипичные аномалии ΔT_m . Поэтому метод восстановления поля $\Delta T_m \rightarrow \Delta z$ можно считать пригодным для большинства случаев «длинных» трасс и наиболее подходящим способом восстановления в случаях сдвигов высокоградиентных велоклинов. Однако, когда изменения формы луча и времени по лучу после верхней точки заворота в аномальной области оказываются значительными (рис.4) больше, чем аномалия, связанная со сдвигом Δz , $\Delta t_a \geq \Delta t(\Delta z_m^+)$, и при этом меняется знак общей аномалии времени ΔT_m , восстановление поля по алгоритму $\Delta T_m \rightarrow \Delta z$ для таких лучей оказывается невозможным. При этом возникает вопрос о возможностях применимости алгоритма на более коротких трассах.

Возможности восстановления на «короткой» трассе. В переменном волноводе заворот луча определяется вертикальным g_z и горизонтальным g_x градиентами скорости звука. От соотношения градиентов g_x/g_z и зависит отличие характеристик луча (χ_o , D_u , z_m , t) до и после точки заворота в аномальной области. При $g_z > 0$ текущее значение угла скольжения луча χ_i увеличивается, его ВТЗ⁺ смещается вверх и назад, большим становится значение χ_i на выходе из зоны аномалии и значения z_m^- и D_u (рис.4). При $g_z < 0$ происходят обратные процессы. Формируемая отличием левой и правой частей луча аномалия времени Δt_a обычно увеличивается с увеличением горизонтального градиента g_x , зависит от положения неоднородности на трассе и ее длины.

Для выяснения влияния длины трассы и положения неоднородности на аномалию времени Δt_a , были выполнены расчеты для короткой трассы. На короткой трассе, $r = 35$ км, задача сканирования области сдвига велоклина неоднородности ($r_n = 9,5$ км, $r_k = 24,0$ км, $L = 14,5$ км) большим числом лучей (рис.5) решается с помощью нескольких точек излучения, $z_u = 200, 500, 700, 900$ и 1100 м, и многих точек приёма, $z_{np} = 100, 200, \dots, 1300$ м (вертикальная цепочка гидрофонов). Положение некоторых ВТЗ⁺ опорных и аномальных лучей и рассчитанные по аномалиям времени ΔT_m вертикальные сдвиги Δz приведены на рис.6. Аналогично случаю длинной трассы (рис.3) слева от зоны гидрофронта, $r < 11,8$ км, рассчитанные значения Δz превышают фактические, справа от зоны, $r > 12,6$ км, они меньше фактических.

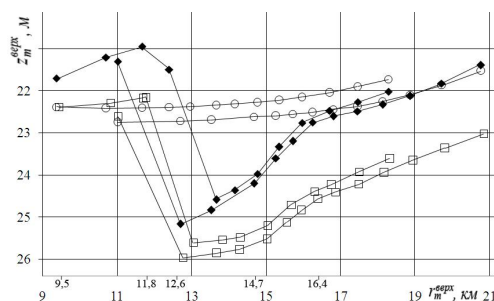


Рис. 6. ВТЗ лучей: опорные (○), аномальные (□) и расчетные (◆).

Аномальный луч, заворачивающий в зоне гидрофронта, $r = 11,8$ км, имеет сильное смещение ВТЗ⁺ по дальности ($\Delta r = 0,62$ км), но вполне удовлетворительное значение аномалии ΔT_m и рассчитанное значение Δz . Как и в случае длинной трассы, результат объясняется значительными изменениями формы луча в аномальной области. На короткой трассе уже нет неправдоподобных аномалий ΔT_m и нет пре-

пятствий к использованию для восстановления всех зондирующих лучей.

Выводы. Показана возможность применения в условиях переменного по трассе волновода метода инверсии аномалий времени лучей в вертикальные сдвиги точек аномальных профилей и возможность восстановления поля температуры ОЧТ в условиях эффекта сдвига термоклина.

Направление продолжения работ состоит в исследованиях влияния горизонтальных градиентов аномалии поля на аномалии времени сканирующих лучей и возможностей восстановления полей неоднородностей с большими градиентами аномалии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Munk W., 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.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2012.– вып.18.– С.15-24.
4. Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. Особенности акустического мониторинга поля температуры Основного черноморского течения в летний период // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2012.– вып.17.– С.132-139.
5. Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Каташинская Н.С., Скипа М.И. Акустический мониторинг поля температуры Основного черноморского течения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.– вып.26.– С.78-89.

Материал поступил в редакцию 11.06.2013 г.
После доработки 25.08.2013 г.

АНОТАЦІЯ Розглядаються питання відновлення аномалії поля неоднорідності методом інверсії аномалій часу променів у вертикальні зсуви точок профілів.

ABSTRACT The questions of reconstruction of anomaly field of inhomogeneities by the method of time ray anomaly inversion into vertical shift of profile points are discussed.