

Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.465

А.Н. Морозов, Е.М. Лемешко

Характеристики звукорассеивающего слоя Черного моря по данным *LADCP*-наблюдений

Обсуждаются результаты акустических исследований, выполненных в мае 2004 г. и июле 2007 г. в западном и центральном районах северной части Черного моря. В качестве высокочастотного эхолота в экспедициях использовался погружаемый акустический доплеровский профиломер течений *LADCP WHM300 RDI*. Полученные данные показывают, что звукорассеивающий слой хорошо выражен в дневное время суток и его центр располагается между изопикнами 15,4 – 15,8 кг/м³. В 64% случаев слой обнаруживается на нижней границе оксиклина ($\sigma_\theta = 15,5 - 15,6$ кг/м³), в 20% случаев – в субкислородной зоне ($\sigma_\theta = 15,6 - 15,8$ кг/м³), в 16% случаев – в оксиклине ($\sigma_\theta = 15,4 - 15,5$ кг/м³). В районе антициклонического вихря наблюдается увеличение ширины и изменение глубины залегания звукорассеивающего слоя. Зоопланктон проявляется в эхосигнале от поверхности моря до нижней границы субкислородной зоны ($\sigma_\theta = 15,9 - 16$ кг/м³).

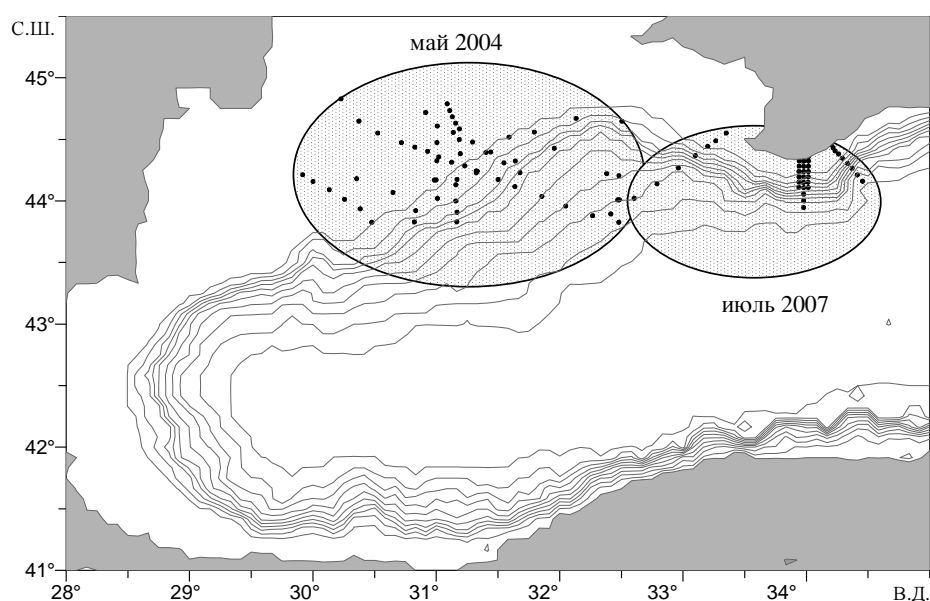
Ключевые слова: звукорассеивающий слой, *LADCP*, Черное море.

Введение. Глубинные звукорассеивающие слои – явление широко распространенное в Мировом океане [1]. Основным источником рассеяния звука в них является зоопланктон, это создает благоприятные предпосылки для изучения его биоресурсов с помощью средств активной акустики [2]. В Черном море характеристики рассеяния звука и их взаимосвязь с обилием зоопланктона изучались с конца 70-х годов XX в. с использованием одночастотного погружаемого эхолота с рабочей частотой 80 кГц [3, 4]. Результаты измерений показали наличие двух разделенных по глубине звукорассеивающих слоев, которые наблюдались в дневное время суток [5, 6]. Более поздние исследования выявили, что доминирующим источником акустического рассеяния в верхнем слое Черного моря на частотах 120, 150 и 200 кГц являются два вида зоопланктона: *Sagitta setosa*, хетогната, и *Calanus euxinus*, копепода [7, 8]. Оба вида имеют суточный цикл миграции. В темное время суток планктон поднимается в верхний слой моря для пополнения пищевых запасов, а дневное время проводит в субкислородной зоне и/или в оксиклине, формируя узкие звукорассеивающие слои [7, 8]. Эти виды зоопланктона являются важными элементами пищевой цепочки Черного моря [9], и поэтому исследованию их обилия и поведения уделяется большое внимание, при этом

© А.Н. Морозов, Е.М. Лемешко, 2013

эффективно используются как сеточные траления [10 – 12], так и акустические методы [7, 8]. Наиболее активно в последнее десятилетие акустические средства применялись для изучения поведения мигрирующего зоопланктона в южной части моря [7, 8, 13], в то время как в северо-западной части такого рода исследования либо не проводились, либо недостаточно отображены в литературе. Цель данной работы – представить результаты измерений вертикального распределения характеристик обратного рассеяния звука, полученные по данным акустических зондирований на частоте 300 кГц в западном и центральном районах северной части Черного моря.

Исходные данные и приборы. В работе использованы материалы, полученные в ходе экспедиций НИС *Akademik* Болгарской АН (9 – 18 мая 2004 г., северо-западная часть Черного моря) и НИС «Эксперимент», Украина (18 – 22 июля 2007 г., вблизи Крымского п-ова). Районы измерений и расположение станций показаны на рис. 1. Для расчетов отбирались данные станций, выполненных в светлое время суток на глубине моря более 200 м.



Р и с. 1. Районы проведения измерений в экспедициях 2004 и 2007 гг. и положение гидрологических станций

В качестве эхолота использовался погружаемый акустический доплеровский профилемер течений (*Lowered ADCP*) [14] *WHM300* (*Work Horse Monitor*, рабочая частота 300 кГц) *RDI*, США. Типовые установки прибора: дискретность по глубине 4 м, по времени 1 с. Скорость погружения прибора во время зондирования составляла 0,5 м/с. Акустическое поперечное сечение обратного рассеяния (σ_{CS} , далее по тексту акустическое сечение) рассчитывалось по интенсивности эхосигнала (EI_M) с учетом рекомендаций [15] и упрощенного соотношения [16]:

$$10 \cdot \lg \left(\frac{\sigma_{CS}}{4\pi} \right) = A - P_{DBW} + K_C \cdot EI_M, \quad (1)$$

где A – неопределенная постоянная; P_{DBW} – мощность излучения в децибелах (дБ) по отношению к 1 Вт (измеряется каждый цикл); K_C – коэффициент преобразования единиц RDI в дБ (в среднем составляет 0,45). В соотношении (1) зависимость от расстояния и длины акустического импульса учитывается в неопределенной постоянной A , т. к. для расчетов был выбран второй сегмент глубины, центр которого удален от преобразователей прибора на фиксированное расстояние 10 м. Значение акустического сечения определяется в относительных единицах. Результирующие профили интерполировались на сетку с шагом 1 м и начинались с глубины 20 м от поверхности моря.

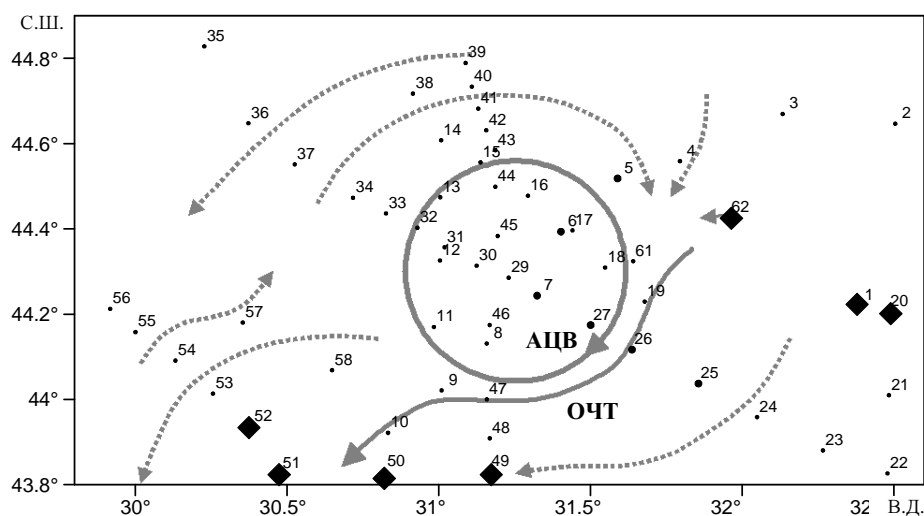
В качестве CTD -зонда в первой экспедиции использовался зонд *SeaBird9+*, во второй – ШИК (МГИ НАН Украины).

Результаты измерений. В экспедиции 2004 г. измерения выполнялись в северо-западной части Черного моря в районах антициклонического вихря (АЦВ), Основного Черноморского течения (ОЧТ), глубоководной части моря и шельфовой зоне. Схема циркуляции вод на глубине 10 м (по *LADCP*-данным) и расположение станций приведены на рис. 2 (воспроизведено из работы [17]). Профили акустического сечения, полученные на разных станциях, показывают значительные отличия в зависимости от района проведения измерений. В районах глубоководной части моря за пределами АЦВ профили имеют один хорошо выраженный максимум. На рис. 3 приведены соответствующие зависимости акустического сечения от глубины и условной плотности (выбранные станции обозначены на рис. 2 черными ромбиками). Значения акустического сечения в максимуме на рассматриваемом ансамбле станций меняются в пределах 132 – 496 при среднем значении 310 и с.к.о. 110. Поведение зависимости в окрестности максимума (z_{\max}) от глубины (z) адекватно воспроизводится гауссовым распределением (рис. 3, *a*)

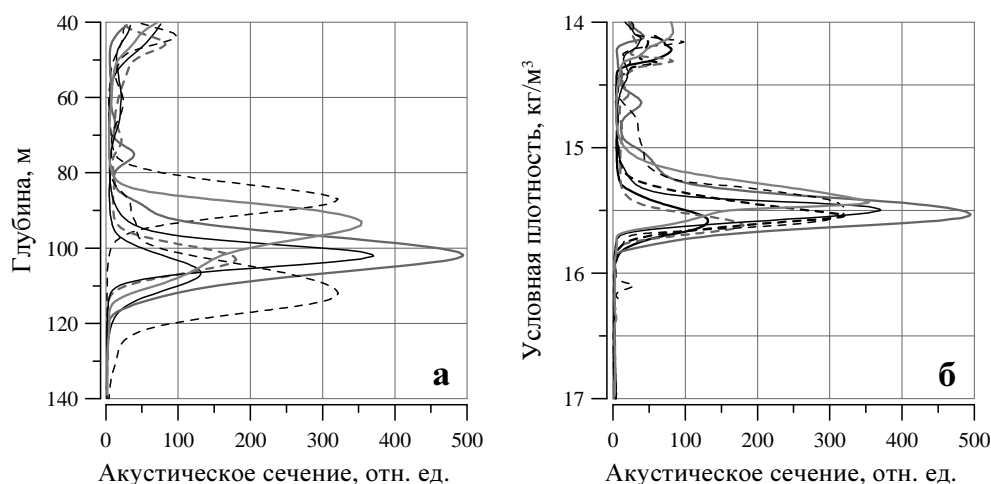
$$\sigma_{CS} = \exp \left(- \left(\frac{z - z_{\max}}{h} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где h – эффективная ширина звукорассеивающего слоя, изменяется в диапазоне 4,5 – 8,5 м при среднем значении 6,46 м. Глубина залегания максимума изменяется от 80 до 120 м. В зависимости от условной плотности (σ_θ) (рис. 3, *b*) положение максимумов сконцентрировано около изопикны 15,53 кг/м³ и изменяется в пределах 15,43 – 15,61 кг/м³ от станции к станции. Сопоставление рис. 3, *a*, *b* показывает, что для выделения общих свойств распределения акустического сечения целесообразно проводить осреднение параметров по ансамблю станций при одинаковых значениях σ_θ . На рис. 4 приведены осредненные распределения частоты плавучести, температуры и акустического сечения по глубине и условной плотности. Центр звукорассеи-

вающего слоя располагается под нижней границей холодного промежуточно-го слоя (8°C), на 20 м ниже максимума частоты плавучести. Максимум осредненного распределения акустического сечения располагается в области изопикны $15,5 \text{ кг/м}^3$ на глубине 100 м.



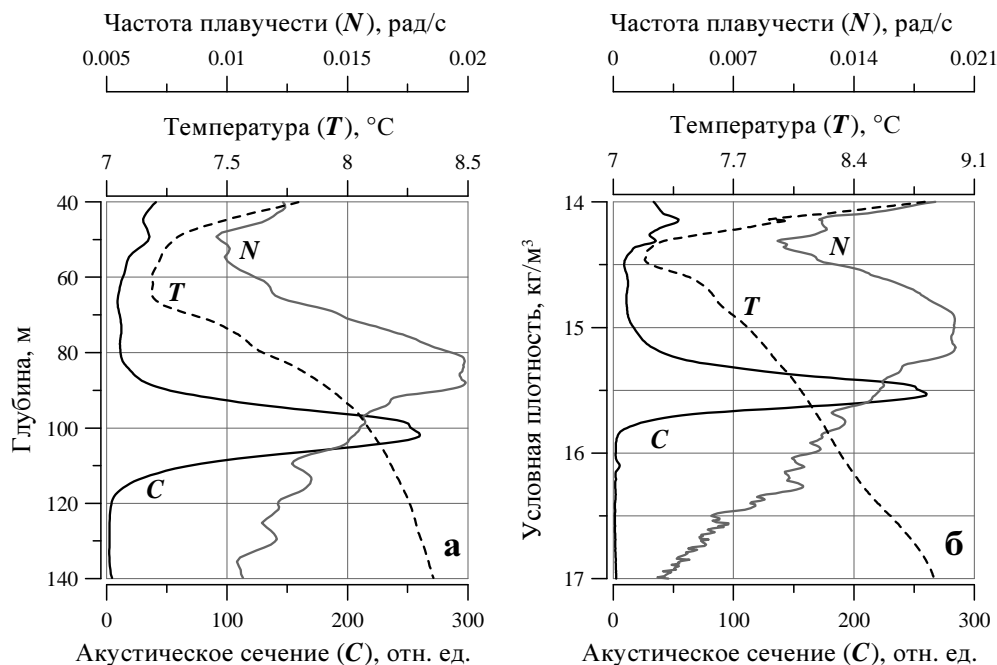
Р и с. 2. Схема циркуляции вод на глубине 10 м и положение гидрологических станций в экспедиции 2004 г. (воспроизведено из работы [17])



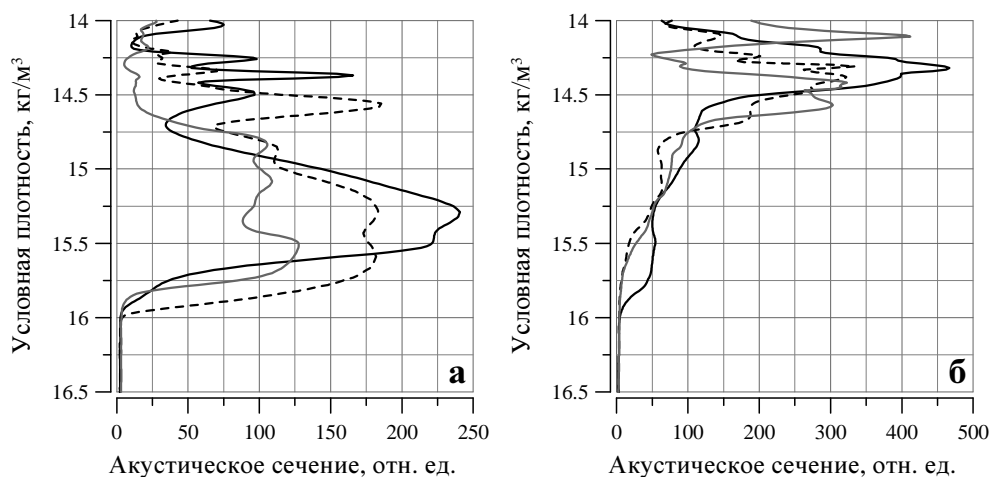
Р и с. 3. Зависимости акустического сечения от глубины (а) и условной плотности (б) на станциях за пределами антициклонического вихря в мае 2004 г.

В области АЦВ и его периферии наблюдаются значительные изменения дневного звукорассеивающего слоя, что может быть вызвано изменением как видового состава зоопланктона за счет вовлечения биоты шельфовой зоны, так и поведения мигрирующего зоопланктона в районах взаимодействия экосистем шельфовой зоны и глубоководной части моря. На рис. 5 приведены

зависимости акустического сечения от плотности для разных районов АЦВ. На южной периферии АЦВ (рис. 5, а, ст. 25 – 27) распределения акустического сечения не имеют острого максимума, звукорассеивающий слой располагается между изопикнами 14,7 и 15,8 кг/м³ и характеризуется шириной от 20 до 50 м. В северо-восточной части вихря (рис. 5, б, ст. 5 – 7) максимум акустического рассеяния наблюдается между изопикнами 14 и 14,8 кг/м³ и предположительно определяется биотой шельфовой зоны.

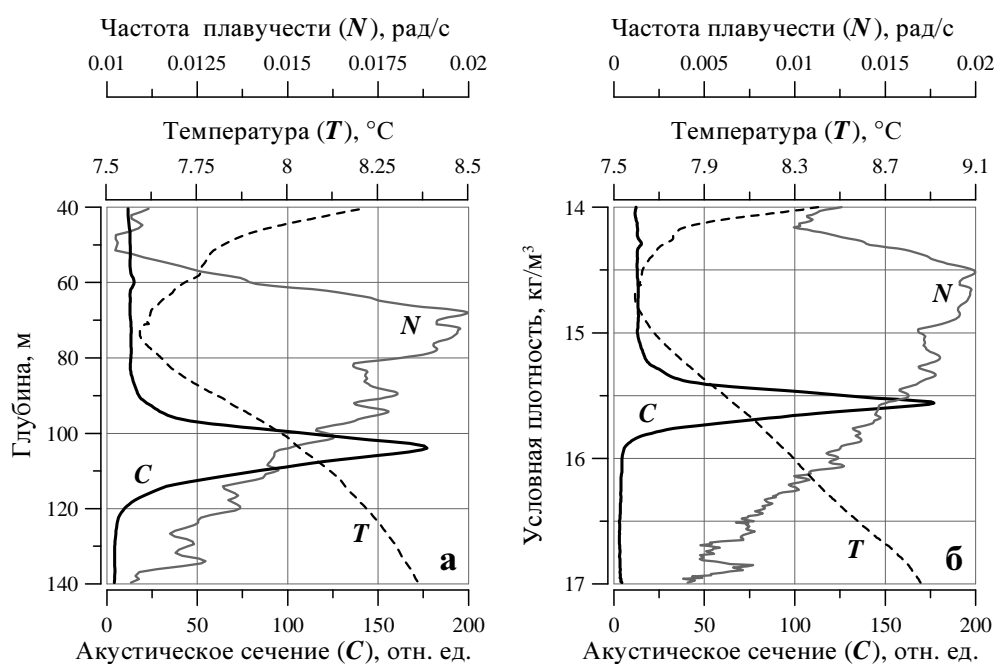


Р и с. 4. Осредненные распределения частоты плавучести, температуры и акустического сечения в зависимости от глубины (а) и условной плотности (б) в мае 2004 г.



Р и с. 5. Зависимости акустического сечения от условной плотности на южной (а) и северо-восточной (б) перифериях антициклонического вихря в мае 2004 г.

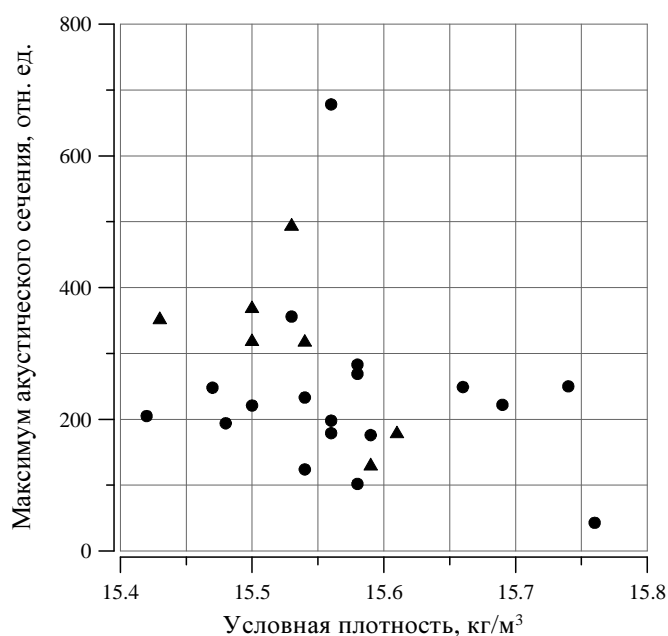
Экспедиция 2007 г. проходила в северном районе центральной части Черного моря (рис. 1), измерения выполнялись в светлое время суток в шельфовой зоне и в глубоководной области. Профили акустического сечения, полученные на 18 станциях, имеют острые максимумы со значениями 43 – 678, среднее значение 237, с.к.о. 131. В окрестности максимума зависимости от глубины хорошо воспроизводились соотношением (2), ширина распределения составляла 3,2 – 5,5 м, среднее значение 4,5. Средняя глубина залегания максимума 104 м, соответствующая изопикна 15,58 кг/м³. Осредненные по ансамблю станций распределения частоты плавучести, акустического сечения и температуры по глубине и условной плотности приведены рис. 6. Полученные распределения аналогичны результатам экспедиции 2004 г. (рис. 4). Отличия наблюдаются в уменьшении эффективной ширины слоя и его отдалении от максимума частоты плавучести на 40 м.



Р и с. 6. Осредненные распределения частоты плавучести, акустического сечения и температуры в зависимости от глубины (а) и условной плотности (б) в июле 2007 г.

Обсуждение. Материалы экспедиций показали, что центр дневного звукорассеивающего слоя располагается в диапазоне значений плотности 15,4 – 15,8 кг/м³. На рис. 7 приведена результирующая зависимость акустического сечения в максимуме от условной плотности (треугольники – 2004 г., кружочки – 2007 г.). Полученные результаты хорошо согласуются с имеющимися представлениями о вертикальном распределении мигрирующего зоопланктона в Черном море в светлое время суток [7, 8]: *S. euxinus* проводит дневное время в оксиклине и/или в субкислородной зоне при концентрациях растворенного кислорода 25 – 35 $\mu\text{M O}_2$ [7], образуя слой шириной 1 – 3 м [18];

S. setosa мигрирует в дневное время от поверхности до оксиклина и/или субкислородной зоны, образуя более широкий слой над слоем дневного обитания *S. euxinus* [8]. В Черном море вертикальное распределение растворенного кислорода устойчиво связано с распределением плотности. В настоящее время разделяют три зоны: кислородная зона – от поверхности до $\sigma_\theta = 14 \text{ кг/м}^3$ [19] ($14,4 - 14,6 \text{ кг/м}^3$ [20]), концентрация $250 - 350 \text{ мМ O}_2$; ниже следует оксиклин до $\sigma_\theta = 15,5 - 15,6 \text{ кг/м}^3$ [19] ($15,6 - 16 \text{ кг/м}^3$ [20]), концентрация в его нижней части уменьшается до $10 - 20 \text{ мМ O}_2$ [19]; под ним располагается субкислородная зона, где концентрация кислорода медленно уменьшается до порога обнаружения при $\sigma_\theta = 15,9 - 16 \text{ кг/м}^3$ [19]. Из рис. 7 следует, что в районах проведения исследований в 64% случаев звукорассеивающий слой обнаруживается на нижней границе оксиклина ($\sigma_\theta = 15,5 - 15,6 \text{ кг/м}^3$), в 20% случаев – в субкислородной зоне ($\sigma_\theta = 15,6 - 15,8 \text{ кг/м}^3$), в 16% случаев – в оксиклине ($\sigma_\theta = 15,4 - 15,5 \text{ кг/м}^3$). Наблюдаемая изменчивость значения акустического сечения в максимуме (среднее по ансамблю 250, с.к.о. 120) определяется неоднородностью пространственного распределения зоопланктона.

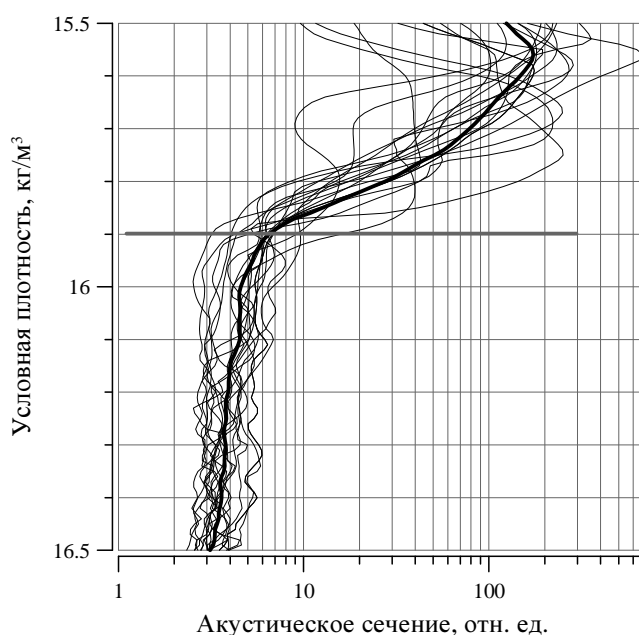


Р и с. 7. Зависимость значения акустического сечения в максимуме от условной плотности в мае 2004 г. (треугольники) и в июле 2007 г. (кружочки)

Известно, что в Черном море при $\sigma_\theta = 15,4 - 15,7 \text{ кг/м}^3$ наблюдается максимум концентрации нитратов [21]. Совпадение положения звукорассеивающих слоев с максимумом концентрации нитратов позволяет сделать предположение об их возможной взаимосвязи. Следуя рассуждениям [22], мигрирующий зоопланктон в ночное время потребляет органические вещества пре-

имущественно в верхнем фотическом слое, а в дневное время выделяет их на соответствующих глубинах в виде растворенных нитрогенов, что составляет определенную часть вертикального потока. С этой точки зрения мигрирующий зоопланктон представляет собой пульсирующий источник нитрогенов в слое максимума концентрации NO_3 .

В Черном море вертикальное распределение акустического сечения имеет хорошо выраженную границу между верхним и нижним слоями. На рис. 8 приведены зависимости акустического сечения от условной плотности для ансамбля станций 2007 г. (жирная линия – осредненная зависимость). В верхнем слое обратное рассеяние определяется наличием живых организмов и характеризуется высоким значением акустического сечения. В нижнем слое рассеяние предположительно формируется отмершими организмами, опускающимися в толщу вод, акустическое сечение здесь остается почти постоянным и имеет небольшие значения. Раздел между верхним и нижним слоями проходит при $\sigma_\theta = 15,9 \text{ кг/м}^3$ (16 кг/м^3 – в районе АЦВ), что соответствует нижней границе субкислородной зоны и началу роста концентрации аммония [19].



Р и с. 8. Зависимости акустического сечения (тонкие линии) от условной плотности на станциях в июле 2007 г. (жирная линия – осредненная зависимость)

Заключение. В рамках данной работы использование *LADCP* позволило определить положение звукорассеивающих слоев и нижней границы обнаружения живых организмов относительно вертикального распределения условной плотности. Количественная оценка биомассы и других характеристик зоопланктона по данным прибора является перспективной задачей, решение которой возможно на основе сопоставления данных синхронных измерений

с результатами сеточного отбора проб [2, 23]. Использование *LADCP* представляется полезным при выполнении биологических станций с целью получения качественной оценки распределения зоопланктона в районе проведения измерений [2].

Работа выполнена в рамках проекта НАН Украины «Фундаментальная океанология» и при поддержке *PERSEUS-FP7*, контракт № 287600. Выражаем глубокую признательность рецензенту, сделавшему ряд полезных замечаний по первому варианту статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978. – 448 с.
2. Flagg C.N., Smith S.L. On the use of the acoustic Doppler current profiler to measure zooplankton abundance // *Deep-Sea Res.* – 1989. – 36, № 3. – P. 455 – 474.
3. Токарев Ю.Н. Гидроакустические характеристики деятельного слоя и их связь с составом и обилием планктона // *Планктон Черного моря.* – Киев: Наук. думка, 1993. – С. 205 – 215.
4. Токарев Ю.Н. Основы биофизической экологии гидробионтов. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 342 с.
5. Сибирцова Е.Н. Особенности вертикального распределения фауны звукорассеивающих слоев в Черном море в осенний период // *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біол.* – 2010. – № 3 (44). – С. 234 – 237.
6. Сибирцова Е.Н., Токарев Ю.Н. Районирование морей Средиземноморского бассейна по акустическим характеристикам верхнего продуктивного слоя // *Морський екологічний журнал.* – 2010. – IX, № 3. – С. 63 – 76.
7. Mutlu E. Acoustic identification of the concentration layer of copepod species, *Calanus euxinus* // *Mar. Biol.* – 2003. – 142. – P. 517 – 523.
8. Mutlu E. Diel vertical migration of *Sagitta Setosa* as inferred acoustically in the Black Sea // *Ibid.* – 2006. – 149. – P. 573 – 584.
9. Виноградов М.Е., Сапожников В.В., Шушкина Е.А. Экосистема Черного моря. – М.: Наука, 1992. – 112 с.
10. Yuneva T.V., Svetlichny L.S., Yunev O.A. et al. Nutritional condition of female *Calanus euxinus* from cyclonic and anticyclonic regions of the Black Sea // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* – 1999. – 189. – P. 195 – 204.
11. Besiktepe S., Unsal M. Population structure, vertical distribution and diel migration of *Sagitta setosa* (Chaetognatha) in the south-western part of the Black Sea // *J. Plankt. Res.* – 2000. – 22, № 4. – P. 669 – 683.
12. Erkan F., Gucu A.C., Zagorodnyaya J. The diel vertical distribution of zooplankton in the Southeast Black Sea // *Turk. J. Zool.* – 2000. – 24. – P. 417 – 427.
13. Mutlu E. Acoustical scattering layers of two mesozooplanktons as a tool for hydrographic features of the Black Sea // *J. Appl. Biol. Sci.* – 2007. – 1. – P. 1 – 8.
14. Firing E., Gordon R. Deep ocean acoustic Doppler current profiling // *Proc. IEEE Fourth Working Conf. on Current Measurement, Clinton, MD.* – 1990. – P. 192 – 201.
15. Deines K.L. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profiler // *Proc. IEEE/OES 6th Working Conf. on Current Measurement Technology.* – 1999. – P. 259 – 264.
16. Морозов А.Н., Лемешко Е.М. Звукорассеивающий слой Черного моря по данным *LADCP*-наблюдений // *Системы контроля окружающей среды.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – Вып. 16. – С. 56 – 61.

17. Лемешко Е.М., Морозов А.Н., Станичний С.В. и др. Вертикальная структура поля скорости течений в северо-западной части Черного моря по данным LADCP в мае 2004 г. // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 6. – С. 25 – 37.
18. Vinogradov M.E., Flint M.V., Shushkina E.A. Vertical distribution of mezoplankton in the open area of the Black Sea // Mar. Biol. – 1985. – 89. – P. 95 – 107.
19. Yakushev E.V., Chasovnikov V.K., Murray J.W. et al. Vertical hydrochemical structure of the Black Sea // The Handbook of Environmental Chemistry. – 2008. – 5, Part Q. – P. 277 – 307.
20. Еремеев В.Н., Коновалов С.К. К вопросу о формировании бюджета и закономерностях распределения кислорода и сероводорода в водах Черного моря // Морський екологічний журнал. – 2006. – V, № 5. – С. 5 – 29.
21. Konovalov S.K., Murray J.W. Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960 – 1995) // J. Mar. Syst. – 2001. – 31. – P. 217 – 243.
22. Longhurst A.R., Harrison W.G. Vertical nitrogen flux from the oceanic photic zone by diel migrant zooplankton and nekton // Deep-Sea Res. – 1988. – 35. – P. 881 – 889.
23. Sutor M., Clows T.J., Peterson W.T. et al. Comparison of acoustic and net sampling systems to determine patterns in zooplankton distribution // J. Geophys. Res. – 2005. – 110. – C10S16, doi:10.1029/2004JC002681. – 11 p.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: anmorozov@yahoo.com

Матеріал поступив
в редакцію 13.12.11
Після доработки 29.03.12

АНОТАЦІЯ Обговорюються результати акустичних досліджень, виконаних в травні 2004 р. і липні 2007 р. в західному та центральному районах північної частини Чорного моря. В якості високочастотного ехолота в експедиціях використовувався занурюваний акустичний доплерівський профіліметр течій LADCP WHM300 RDI. Отримані дані показують, що звукокорозіювальний шар добре виражений удень та його центр розташовується між ізопікнами 15,4 – 15,8 кг/м³. У 64% випадків шар виявляється на нижній межі оксиклину ($\sigma_\theta = 15,5 - 15,6$ кг/м³), у 20% випадків – у субкисневій зоні ($\sigma_\theta = 15,6 - 15,8$ кг/м³), у 16% випадків – в оксиклині ($\sigma_\theta = 15,4 - 15,5$ кг/м³). У районі антициклонного вихору спостерігається збільшення ширини та зміна глибини залягання звукокорозіювального шару. Зоопланктон проявляється в ехосигналі від поверхні моря до нижньої межі субкисневої зони ($\sigma_\theta = 15,9 - 16$ кг/м³).

Ключові слова: звукокорозіювальний шар, LADCP, Чорне море.

ABSTRACT Results of acoustic investigations carried out in May, 2004 and July, 2007 in the western and central parts of the northern Black Sea are discussed. The Lowered Acoustic Doppler Current Profiler LADCP WHM300 RDI was used in the expeditions as a high-frequency echo-sounding device. The obtained data show that a sonic scattering layer is well pronounced during daylight and its center is located between the isopycnals 15.4 – 15.8 kg/m³. In 64% of the cases, the layer is revealed on the oxycline lower boundary ($\sigma_\theta = 15.5 - 15.6$ kg/m³), in 20% – in the sub-oxygen zone ($\sigma_\theta = 15.6 - 15.8$ kg/m³), in 16% – in the oxycline ($\sigma_\theta = 15.4 - 15.5$ kg/m³). Increase of the sonic scattering layer' width and change of its depth location are observed in the area of an anticyclonic eddy. Zooplankton in the layer is manifested in the echo-signal from the sea surface up to the sub-oxygen zone lower boundary ($\sigma_\theta = 15.9 - 16$ kg/m³).

Keywords: sonic scattering layer, LADCP, Black Sea.