

ЗВУКОРАССЕИВАЮЩИЙ СЛОЙ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ LADCP НАБЛЮДЕНИЙ

A.H. Морозов, Е.М. Лемешко

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: annmorozov@yahoo.com

В статье рассматривается применение ADCP в качестве погружаемого эхолота. На основе анализа профилей акустического поперечного сечения показано, что глубинный звукорассеивающий слой в Черном море хорошо выражен в дневное время суток и его центр располагается на глубине залегания изотикины 15,5 кг/м³. Акустически определяемые на частоте 300 кГц живые организмы прослеживаются до глубины залегания изотикины 16 кг/м³.

Введение. Акустические методы длительное время эффективно применяются для исследования распределения зоопланктона в морях и океанах [1 – 3]. До 1980 г. использование таких методов в практике натурных исследований ограничивалось дорогоизнной соответствующей аппаратуры и сложностью обработки информации [4]. С началом коммерческого выпуска акустических доплеровских профилемеров течений ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) [5], измеряющих одновременно как профили скорости течений, так и профили интенсивности эхосигнала, одночастотные акустические средства получили значительно более широкое распространение при проведении исследований в различных районах Мирового Океана. В настоящее время такие приборы широко используются для изучения циклов вертикальной миграции [6, 7] и распределения биомассы зоопланктона [4].

В практике экспедиционных работ МГИ НАН Украины, начиная с 2004 г., используется погружаемый профилемер течений (LADCP) [8] на основе *WHM300* (*Work Horse Monitor*, рабочая частота 300 кГц) RDI, США. Цель данной работы обобщить собранный в экспедициях материал с целью понимания, какую дополнительную полезную информацию

можно получить на основе данных по интенсивности эхосигнала.

Принцип работы. В состав ADCP входят четыре электроакустических преобразователя, формирующие акустические лучи, отклоненные на 20° от продольной оси и развернутые на 90° друг относительно друга в поперечной плоскости прибора. Каждый цикл измерения производится излучение высокочастотных акустических импульсов вдоль каждого из лучей. После окончания излучения осуществляется прием эхосигналов, которые разбиваются на временные окна, соответствующие заданной дискретности измерения по глубине. В выделенных сегментах эхосигнала определяется доплеровский сдвиг частоты, по которому рассчитываются проекции скорости течения на лучи, и регистрируется интенсивность принятого сигнала. Детально принцип работы прибора изложен в работе [5].

В данной статье рассматривается использование LADCP в качестве погружаемого эхолота, измерения выполняются при погружении прибора. В результате зондирования определяется вертикальное распределение интенсивности эхосигнала, рассеянного от объема воды во втором сегменте глубины. Использование данных более удаленных сегментов не выявляет значительных отличий, но отдаляет начало профиля от поверхности моря. Данные первого сегмента, как правило, оказываются зашумленными, вследствие присутствия звуковых колебаний в конструкциях прибора после излучения зондирующего акустического импульса [4, 5].

Расчетные соотношения. По измеренному значению интенсивности эхосигнала (EI_M) рассчитывается значение коэффициента обратного рассеяния (S_v) с использованием упрощенного соотношения

$$S_v = C + P_{DBW} + K_c \cdot EI_M, \quad (1)$$

где C – неопределенная постоянная; P_{DBW} – мощность излучения в децибелах (дБ) по отношению к 1 Вт; K_c – коэффициент преобразования единиц RDI в дБ. P_{DBW} – измеряется каждый цикл, K_c –

в среднем составляет 0,45. Детально процедуру расчетов можно найти в работах [9, 10].

Коэффициент обратного рассеяния удобнее выразить через значение акустического поперечного сечения (σ) по соотношению [4, 11]

$$S_v = 10 \cdot \lg \left(\frac{\sigma}{4\pi} \right). \quad (2)$$

Акустическое поперечное сечение определяется количеством рассеивателей в озвученном объеме, их размерами и материалом, из которого они состоят, и может быть представлено следующей суммой

$$\sigma = \sum_{i=1}^N n_i \cdot \sigma_i, \quad (3)$$

где n_i – концентрация i -ой группы рассеивателей, σ_i – акустическое поперечное сечение единичного элемента i -ой группы.

Известно, что на частотах выше 200 кГц основной причиной рассеяния звука в море является зоопланктон [11]. Акустическое поперечное сечение единичной особи различных видов зоопланктона может быть рассчитано с использованием моделей, представленных в работе [12]. Из соотношения (3) следует, что для определения концентраций различных типов рассеивателей по акустическому поперечному сечению необходимо, дополнительно, знание относительного распределения концентраций по группам. Таким образом, акустическое поперечное сечение измеряемое прибором представляет собой интегральный параметр определяемый численностью, видовым и размерным составом зоопланктона в озвученном объеме. В работе [4] показано, что в ряде случаев, когда акустические свойства и размеры различных видов зоопланктона, находящихся в озвученном объеме, близки, может быть установлена взаимосвязь между акустическим поперечным сечением и общей биомассой (M) зоопланктона, которая выражается соотношением

$$M = 10^{A+B \cdot S_v}, \quad (4)$$

где A, B – коэффициенты, которые определяются на основе сопоставления

ADCP-измерений с данными биологических сеточных станций. В экспедициях материалы, которых обсуждаются в статье, совместных биологических станций не проводилось, поэтому в качестве анализируемого параметра используется акустическое поперечное сечение (2) (далее по тексту *акустическое сечение*).

Результаты измерений. В качестве исходного материала в работе использованы данные, полученные в ходе экспедиций, проходивших в северо-западной части Черного моря с 2004 по 2007 год (май 2004, октябрь 2005, июль 2007). Типовые параметры выполнения зондирований: дискретность по глубине 4 метра, удаление объема измерения 10 м (второй сегмент глубины), объем осреднения 1 м³, дискретность по времени 1 с, скорость погружения прибора 0,5 м/с.

Измерения, выполненные на станциях в открытом море, показали значительное различие распределений акустических рассеивателей в дневное и ночное время суток. На рис. 1 приведены примеры типовых профилей акустического сечения, полученные в дневное (черная жирная линия) и ночное время (серая тонкая линия). Акустическое сечение выражено в относительных единицах. Тонкой пунктирной линией представлен профиль плотности (верхняя шкала).

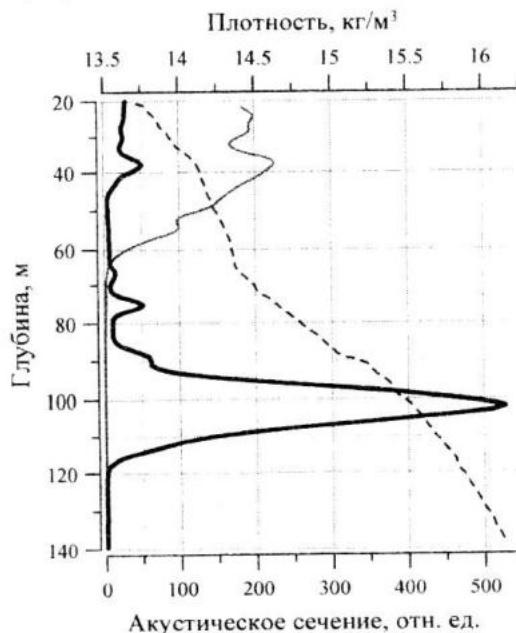


Рис. 1. Профили акустического сечения в дневное (черная жирная линия) и ночное (тонкая серая линия) время суток .

В дневное время в нижней части основного пикноклина наблюдается хорошо выраженный максимум акустического сечения, который определяет центр звукорассеивающего слоя. Известно, что в Черном море глубинный звукорассеивающий слой формируется мигрирующим зоопланктоном *Calanus euxinus* и *Sagitta setosa* [13]. *C. euxinus* доминирует по биомассе в открытой части моря, *S. setosa* – в районе свала глубин [14, 15]. В ночное время суток мигрирующий зоопланктон поднимается в верхний слой моря для пополнения питательных запасов (рис. 1, серая тонкая линия). В силу технологии выполнения измерений, ADCP не позволяет проводить измерения в верхнем 20-ти метровом слое моря, в котором в ночное время концентрируется большая часть, как мигрирующего планктона, так и многообразной биоты приповерхностного слоя [13]. Исходя из этого, наибольшая информативность использования прибора в качестве эхолота ожидается при исследовании распределения зоопланктона в дневном звукорассеивающем слое, который имеет хорошо выраженные границы по глубине и ограниченный видовой состав формирующего его планктона [13].

Дневной звукорассеивающий слой в Черном море имеет тенденцию располагаться на глубине залегания фиксированной изопикны, как и большинство физических и биохимических характеристик [15]. На рис. 2 приведены распределения акустического сечения в зависимости от плотности воды: серые тонкие линии – профили, полученные на дневных станциях, черная жирная линия – изопикнически осредненный по ансамблю всех дневных станций профиль; пунктирная линия представляет аналогично осредненный профиль частоты плавучести (верхняя шкала). Максимум распределения акустического сечения (максимум биомассы зоопланктона [4]) в дневное время находится на изопикне $15,5 \text{ кг}/\text{м}^3$, ниже максимума частоты плавучести (изопикна $15 \text{ кг}/\text{м}^3$). Отметим, что глубина залегания изопикны $15,5 \text{ кг}/\text{м}^3$ в пределах ансамбля станций, по которому выполнялось осреднение, изменялась в пределах 50 метров [16].

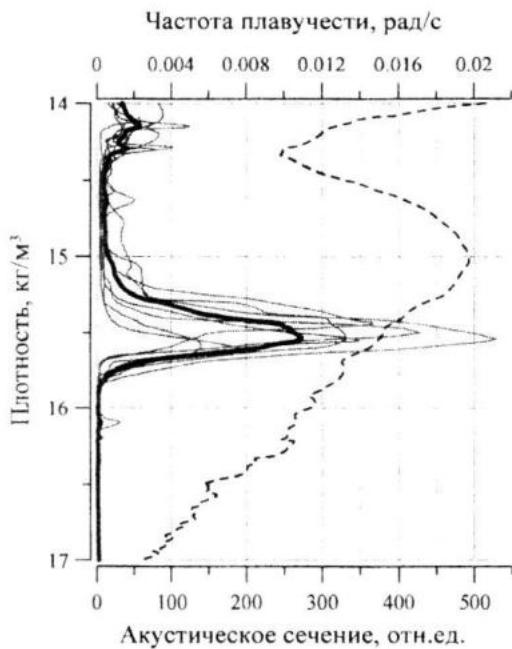


Рис. 2. Зависимость акустического сечения и частоты плавучести от плотности

На рис. 3 приведены профили изопикнически осредненных по ансамблю станций, черная жирная линия – акустическое сечение, тонкая серая линия – температура воды, пунктирная линия – частота плавучести. Звукорассеивающий слой располагается в среднем на 40 м

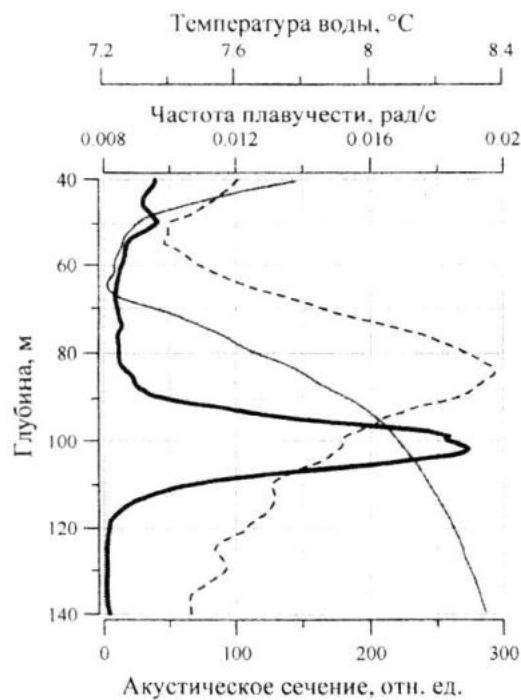


Рис. 3. Осредненные профили акустического сечения (черная), частоты плавучести (пунктир) и температуры воды (серая)

глубже нижней границы холодного промежуточного слоя, и на 20 м глубже максимума частоты плавучести. Наблюдаемая ширина слоя составляет 20 м. Известно, что слои дневного обитания *C. euxinus* и *S. setosa* имеют ширину от 1 до 3 м, при этом слой *S. setosa* располагается на несколько метров выше слоя *C. euxinus* [13]. Наблюданное несоответствие может быть вызвано, как ансамблевым осреднением, так и свойственным прибору осреднением по глубине (5 м), вследствие чего звукорассеивающие слои могут сливаться в данных ADCP.

В дневное время мигрирующий планктон погружается под основной пикноклин (ниже максимума частоты плавучести), что прослеживается во все представленные сезоны. В мае, июле дневной звукорассеивающий слой располагается на глубине залегания изопикны 15,5 кг/м³, в октябре наблюдается смещение звукорассеивающего слоя в область изопикны 15,7 кг/м³. Интегральный показатель звукорассеиваю-

$$H_{16} \text{---} H_{15} \quad IP = \int_{H_{15}}^{H_{16}} \sigma^{0.7} \cdot dz, \quad H_{15} \text{ --- глубина залегания изопикны } 15 \text{ кг/м}^3,$$

бина залегания изопикны 15 кг/м³, H_{16} – 16 кг/м³, показатель степени заимствован из работы [4] для установления взаимосвязи с биомассой зоопланктона) проявляет высокую изменчивость от станции к станции с размахом (IP_{Max} / IP_{Min}) достигающем значений 3 – 7 для разных сезонов. Поведение интегрального показателя на разрезах не выявляет значимых закономерностей. Для мая интегральный показатель составил 640, июль – 350, октябрь – 500 относительных единиц, что представляется следствием сезонной изменчивости биомассы мигрирующего зоопланктона.

В Черном море характеристики акустического рассеяния, на частоте 300 кГц, проявляют хорошо выраженное двухслойное строение (рис. 4). В верхнем слое обратное рассеяние акустических сигналов определяется наличием живых организмов и выражается в относительно высоком значении коэффициента обратного рассеяния. В нижнем слое обратное рассеяние предположительно формируют отмершие организ-

мы, опускающиеся в толщу вод, и соответствующий коэффициент обратного рассеяния значительно уменьшается. В 80 % профилей, акустически обнаруживаемые живые организмы наблюдаются до глубины залегания изопикны 16 кг/м³, которая расположена в среднем на 20 м выше начала сероводородного слоя (изопикна 16,2 кг/м³). Возможно, предельная глубина проникновения живых организмов регулируется распределением растворенного кислорода [13].

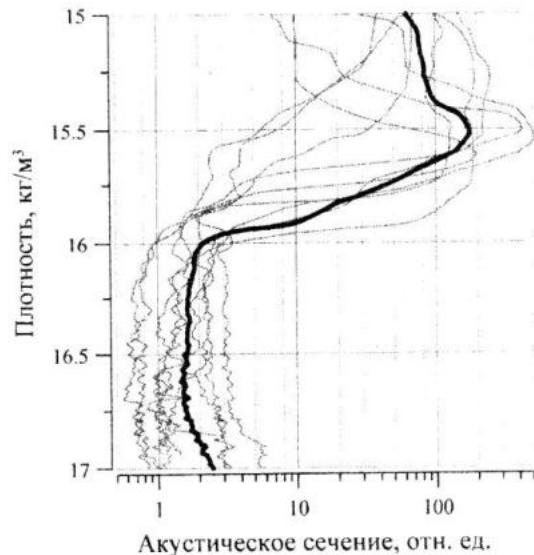


Рис. 4. Граница между верхним и нижним слоями моря

В области антициклонического вихря северо-западной части Черного моря, дневной звукорассеивающий слой претерпевает значительные изменения, что может быть вызвано как изменением видового состава зоопланктона за счет вовлечения биоты шельфовой зоны, так и вследствие изменения поведения мигрирующего зоопланктона в районах взаимодействия экосистем шельфовой зоны и открытого моря. На рис. 5 приведены типовые профили эффективного попреречного сечения: черная жирная линия – южная часть вихря на границе с открытым морем; тонкая линия – северо-восточная часть вихря, район вовлечения шельфовых вод. В южной части наблюдается увеличение толщины слоя до 40 – 50 метров, акустическое сечение имеет почти постоянное значение в слое между изопикнами 14,7 и 15,8 кг/м³. В северо-восточной части вихря характерным яв-

ляется наличие максимума поперечного сечения на глубине залегания изопикны $14.3 \text{ кг}/\text{м}^3$, что предположительно может объясняться изменением видового состава за счет вовлечения в этот районе биоты шельфовой экосистемы.

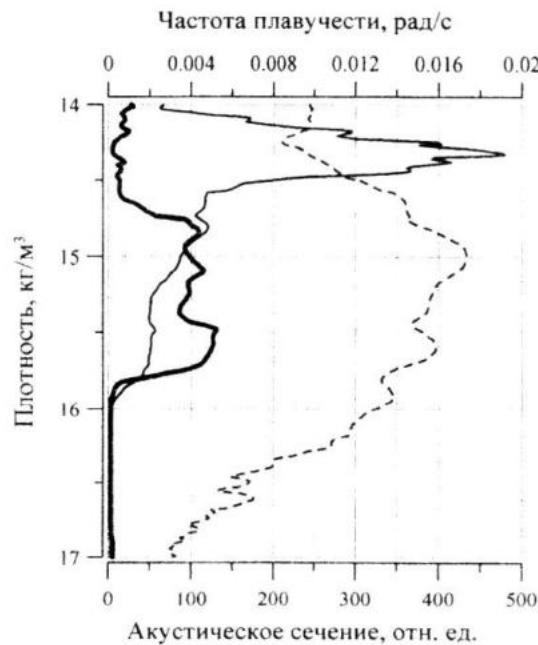


Рис. 5. Звукорассеивающие слои в антициклическом вихре

Заключение. Основное назначение ADCP это измерение профилей скорости течений, интенсивность эхосигнала является дополнительно регистрируемым технологическим параметром. Измерения логарифма интенсивности эхосигнала производятся с помощью восьми разрядного аналого-цифрового преобразователя, с погрешностью 0.5 дБ, обладающего хорошей температурной и временной стабильностью [9]. Такой разрядности измерений оказывается достаточно для определения биомассы ограниченного видового состава зоопланктона с погрешностью 10 % [4]. В Черном море условия, при которых возможна оценка биомассы зоопланктона по данным ADCP [4], ограничиваются глубинным звукорассеивающим слоем, который формируется мигрирующим зоопланктом в дневное время суток. Основная проблема использования интенсивности эхосигнала для численной оценки биомассы, состоит в необходимости проведения калибровки прибора на основе мульти сеточных биологиче-

ских измерений [4]. Вторая проблема возникает вследствие свойственного прибору пространственного осреднения, превышающего, ожидаемую толщину звукорассеивающего слоя 3 м [13].

Использование интенсивности эхосигнала, при наличии калибровочных коэффициентов, дает преимущество в оперативности проведения измерений по сравнению с сеточными станциями. Как правило, прибор крепится на раму CTD зонда и измерения производятся на каждой гидрологической станции, что позволяет набрать большую статистику для оценки биомассы соответствующих видов зоопланктона.

Второе преимущество заключается в более высоком разрешении измерений по глубине и их синхронности с измерениями гидрологических характеристик. В рамках данной статьи на основе анализа профилей акустического поперечного сечения обратного рассеяния показано, что глубинный звукорассеивающий слой в открытой части Черного моря наиболее хорошо выражен в дневное время суток на глубине залегания изопикны $15.5 \text{ кг}/\text{м}^3$. В Черном море эта изопикна соответствует максимуму концентрации нитратов [16]. Мигрирующий зоопланктон может вносить определенный вклад в распределение нитратов в глубоких слоях моря, за счет того, что в ночное время пополняет запасы питательных веществ в верхнем слое, а в дневное время выделяет их часть в виде растворенных нитро-генов на соответствующей глубине [17].

В Черном море акустически определяемые на частоте 300 кГц живые организмы обнаруживаются в верхнем слое до глубины залегания изопикны $16 \text{ кг}/\text{м}^3$.

В районах взаимодействия экосистем открытого моря и шельфовой зоны профили акустического поперечного сечения имеют слоистую структуру, которая формируется большим видовым разнообразием живых организмов. В данных условиях использование ADCP в качестве эхолота ограничивается возможностью оперативного наведения мульти сеточных биологических измерений.

Работа выполнена в рамках проектов «Управление» и «Фундаментальная океанология».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holliday D.V., Pierer R.E. Volume scattering strengths and zooplankton distribution at acoustic frequencies 0.5 and 3 MHz // Journal of the Acoustical Society of America, 1980. – 67. – P. 135 – 146.
2. Wiebe P.H., Mountain D.G., Stanton T.K., Greene C.H., Lough R.G., Kaartvedt S., Dawson J. and Copley N.J. Acoustical study of the spatial distribution of plankton on Georges Bank and the relationship between volume back-scattering strength and taxonomic composition of the plankton // Deep-Sea Research, 1996. – part II , 43. – P. 1971 – 2001.
3. Sutor M., Clows T.J., Peterson W.T., Lamb J. Comparison of acoustic and net sampling systems to determine patterns in zooplankton distribution // Journal of Geophysical Research, 2005. – 110. – C10S16, doi:10.1029/2004JC002681. – 11 p.
4. Flagg C.N. and Smith S.L. On the use of the acoustic Doppler current profiler to measure zooplankton abundance // Deep-Sea Research, 1989. – vol. 36, No 3. – P. 455 – 474.
5. Gordon R.L. Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation: A Practical Primer // RD Instruments, 1996. – 54 p.
6. Falk-Petersen S., Leu E., Berge J., Kwasniewski S., Nygard H., Rostad A., Keskinen E., Thormar J., Quillfeldt C., Wold A., Gulliksen B. Vertical migration in high Arctic waters during autumn 2004 // Deep-Sea Research II, 2008. – 55. – P. 2275 – 2284.
7. Cisewski B., Strass V.H., Rhtin M., Kragefsky S. Seasonal variation of the diel vertical migration of zooplankton from ADCP backscatter time series data in the Lasarev Sea, Antarctica // Deep-Sea Research I, 2010. – 57. – P. 78 – 94.
8. Firing E., Gordon R. Deep ocean acoustic Doppler profiling // Proc. IEEE Fourth Working Conf. in Current Measurements, Clinton, MD, Current Measurement Technology Committee of the Ocean Engineering Society, 1990. – P. 192 – 201.
9. Deines K.L. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profiler // Proceeding IEEE/OES 6th Working Conference on Current Measurement Technology, 1999. – P. 259 – 264.
10. Морозов А.Н., Лемешко Е.М. Оценка концентрации взвеси по данным ADCP WHM1200 // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – Вып. 14. – С. 42 – 46.
11. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978. – 448 с.
12. Stanton T.K., Chu D., Wiebe P.Y. Sound scattering by several zooplankton groups. II. Scattering models // The Journal of the Acoustical Society of America, 1998. – 103. – P. 236 - 253.
13. Muthu E. Acoustic identification of the concentration layer of copepod species, Calanus euxinus // Marine biology, 2003. – 142. – P. 517 – 523.
14. Анинский Б.Е., Тимофе Ф. Распределение зоопланктона в западном секторе Черного моря в октябре 2005 г. // Морской экологический журнал, 2009. – №1. – С. 17 – 31.
15. Besiktepe S., Unsal M. Population structure, vertical distribution and diel migration of Sagitta setosa (Chaetognatha) in the south-western part of the Black Sea // Journal of Plankton Research, 2000. – Vol. 22. – no. 4. – P. 669 – 683.
16. Кондратьев С.И., Романов А.С., Внуков Ю.Л. Особенности распределения гидрохимических характеристик в районе материкового склона северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал, 2007. – № 5. – С. 69 – 79.
17. Longhurst A.R., Bedo A.W., Yarrison W.G., Head E.J.H., Sameoto D.D. Vertical flux of respiratory carbon by oceanic diel migrant biota // Deep-Sea Research, 1990. – 37. – P. 685 – 694.