

ЗВУКОРАССЕИВАЮЩИЕ СЛОИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ADCP-НАБЛЮДЕНИЙ

© 2017 г. А. Н. Морозов^а, *, Е. М. Лемешко^б, **, С. В. Федоров^а, ***

^аМорской гидрофизический институт РАН
299011 г. Севастополь, ул. Капитанская 2

^бЧерноморский гидрофизический полигон РАН
298688 г. Ялта, пгт. Кацивели, ул. Ак. Шулейкина 9

*e-mail: anmorozov@mhi-ras.ru

**e-mail: evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru

***e-mail: s.fedorov@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 22.03.2016 г.

Обсуждаются результаты экспедиций в северо-западную часть Черного моря, выполненных в 2004–2008 гг. В качестве эхолотов использовались акустические доплеровские профилометры течений (ADCP) с рабочей частотой 150 и 300 кГц. Определены характерные масштабы пространственной изменчивости рассеяния звука в Черном море и дана интерпретация выявленных особенностей. Приведены характеристики глубинного звукорассеивающего слоя Черного моря.

Ключевые слова: звукорассеивающие слои, ADCP, Черное море.

DOI: 10.7868/S0320791917050094

ВВЕДЕНИЕ

Звукорассеивающие слои (ЗРС) в водах Мирового океана были открыты в конце 40-х годов XX века [1]. Первоначально ЗРС изучались в диапазоне относительно низких частот звуковых сигналов, до 20 кГц, имеющем наибольшее прикладное значение. Исследования показали, что звукорассеивающие слои могут иметь как биологическую природу, так и формироваться неоднородностями водной среды, в частности температурными [2]. Основной причиной обратного рассеяния звука на низких частотах являются гидробионты с характерными размерами несколько сантиметров [3, 4]. На частотах более 100 кГц основной причиной обратного рассеяния звука, как правило, является зоопланктон с характерными размерами порядка 1 мм [5], что создает благоприятные предпосылки для его изучения средствами активной акустики.

В Черном море характеристики рассеяния звука на частоте 80 кГц и их взаимосвязь с обилием зоопланктона изучались в 80–90-х годах XX века с использованием одночастотного погружаемого эхолота [6, 7]. Результаты этих измерений показали наличие двух разделенных по глубине ЗРС, которые наблюдались в дневное время суток [8, 9]. Более поздние исследования выявили, что доминирующим источником акустического рассеяния в деятельном слое Черного моря на частотах 120, 150 и 200 кГц являются два вида зоопланктона: хе-

тогната (*Sagitta setosa*) и копепода (*Calanus euxinus*) [10, 11].

Оба вида имеют суточный цикл миграции. В темное время суток планктон поднимается к поверхности моря, а дневное время проводит на глубинах около 100 м, формируя узкие звукорассеивающие слои с характерными размерами 1–3 м [12]. Хетогната и копепода являются важными элементами пищевой цепочки в Черном море. При изучении этих видов зоопланктона эффективно используются как сеточные траления [13–15], так и акустические методы [16]. Использование специализированных научных эхолотов с борта судна, в частности, позволило детально восстановить картину суточной миграции этих видов зоопланктона в южной части Черного моря [10, 11].

Высокочастотные средства активной акустики длительное время эффективно используются для исследования распределения зоопланктона в морях и океанах [17–20]. До 1980 г. использование таких методов в практике натурных исследований ограничивалось дороговизной соответствующей аппаратуры [21]. С началом коммерческого выпуска акустических доплеровских профилометров течений (ADCP), измеряющих одновременно как профили скорости течений, так и профили интенсивности эхосигнала, появились новые возможности в исследовании акустических свойств вод Мирового океана [22–24]. В настоящее время ADCP

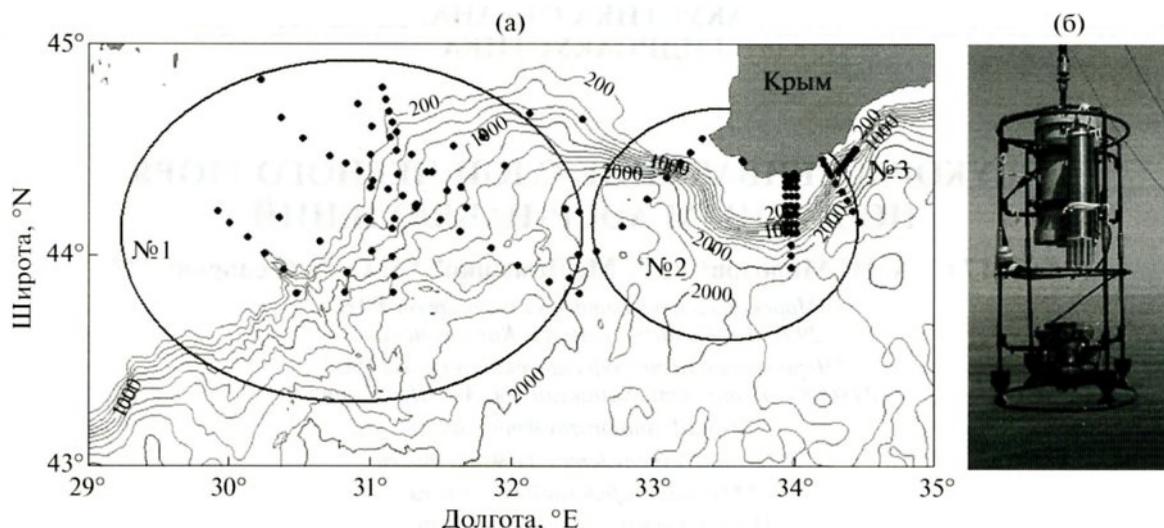


Рис. 1. Расположение станций по экспедициям (а) и внешний вид прибора (б).

широко используются для изучения в основном поведенческих характеристик зоопланктона [25–27].

В практике экспедиционных работ Морского гидрофизического института (МГИ) ADCP производства RDI используются с 2004 г., и в настоящее время собрано большое количество натуральных данных для различных районов Черного моря и разных сезонов. Цель данной работы – обобщить собранный в экспедициях материал с целью понимания, какую дополнительную полезную информацию можно получить на основе данных по интенсивности эхосигнала, измеряемых ADCP.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе в основном использованы материалы экспедиций, проходивших в северо-западной части Черного моря: № 1 – с 9 по 18 мая 2004 г. [28]; № 2 – с 18 по 22 июля 2007 г. [29]; № 3 – с 6 по 15 сентября 2008 г. [30]. На рис. 1а схематично представлены районы проведения измерений и расположение станций в каждой из экспедиций.

В экспедициях № 1 и 2 в качестве профилометра использовался погружаемый ADCP на основе WHM300 (рабочая частота 307 кГц, номинальный диапазон профилирования ~120 м) производства RDI. Внешний вид прибора в сборе приведен на рис. 1б. Использование ADCP в режиме погружаемого зонда (LADCP) широко распространено при исследовании распределения течений в морях и океанах [28, 31–33]. Такой способ измерений дает уникальную возможность получить распределение скорости течений по всей толще водного столба, многократно превышающего рабочий диапазон прибора [34]. Первая

LADCP-станция была выполнена в 1989 г. [35]. В последующие годы метод получил дальнейшее развитие [36, 37], и в рамках проекта WOCE профилометр LADCP использовался как штатный океанографический прибор [34].

Схематично процесс измерения приведен на рис. 2а. Скорость погружения/подъема прибора во время зондирования составляла 0.5 м/с. Установки ADCP: дискретность по глубине 4 м, число сегментов глубины 27, дискретность по времени 1 с, опция LADCP включена в режиме HR/LR. STD-измерения выполнялись зондом SeaBird9 (2004 г.) и ШИК МГИ (2007 г.).

В экспедиции № 3 судно было оснащено бортовым ADCP RDI (VMADCP) с рабочей частотой 154 кГц. Запись данных велась непрерывно. Установки прибора: дискретность по глубине 4 м, число сегментов глубины 60, дискретность по времени 5 с, опция WP включена в режиме HR/LR, диапазон опции BT 500 м. Для STD-измерений использовался зонд SeaBird9.

ADCP RDI измеряют интенсивность эхосигнала EI_m в единицах RDI. Для расчета силы обратного рассеяния S_v (в децибелах по отношению к $4\pi \times 1$ м) изготовителем предложено соотношение [38]

$$S_v = C + 10 \lg T_x - P_{DBW} + [2\alpha R + 10 \lg R^2 - L_{DBM}] + K_c(EI_m - EI_n), \quad (1)$$

где C – постоянная, определяемая по результатам калибровки; T_x – температура электроакустического преобразователя в кельвинах; P_{DBW} – мощность излучения в децибелах по отношению к 1 Вт; $L_{DBM} = 10 \lg(L_{Tr})$ – длина излучаемого импульса L_{Tr} в децибелах по отношению к 1 м; α –

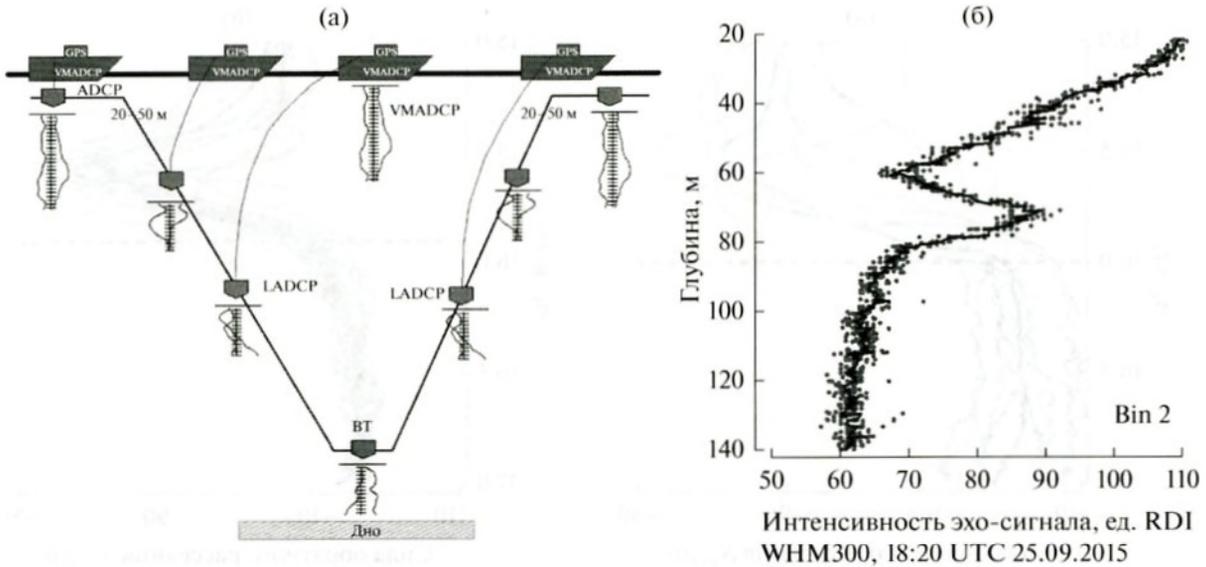


Рис. 2. Схема выполнения зондирования (а) и пример профиля интенсивности эхосигнала (б).

коэффициент поглощения звука в дБ/м; множитель “2” учитывает прохождение сигнала до объема измерения и обратно; EI_m – интенсивность шумового фона в единицах RDI, определяемая в процессе тестирования прибора; R – расстояние до центра озвученного объема в метрах; K_c – коэффициент преобразования условных единиц RDI в децибелах.

Необходимые справочные данные для определения C для разных продуктов RDI и последовательность расчета S_v приведены в [38]. Заявленная случайная составляющая погрешности определения S_v для широкополосного режима ВВ составляет 1 дБ, систематическая составляющая погрешности ± 3 дБ.

В практике МГИ для расчета силы обратного рассеяния используется следующее соотношение [39]:

$$S_v = C^* + 10 \lg T_x - P_{DBW} - 10 \lg \left(\int_{R-L_T/2}^{R+L_T/2} \frac{10^{-2\alpha(R+\eta)/10}}{(R+\eta)^2} d\eta \right) + 10 \lg \left(10^{K_c EI_m / 10} - 10^{K_c EI_n / 10} \right). \quad (2)$$

Такое представление дает более точные оценки коэффициента в условиях малой концентрации взвешенного вещества в удаленных сегментах глубины, что наиболее актуально для обработки данных VMADCP. На рис. 3 приведена зависимость измеренного значения интенсивности эхосигнала EI_m от расстояния до центра озвученного объема: черные треугольники – измеренные значения, сплошная черная линия соответствует соотношению (1), пунктирная линия – соотношению (2).

Как видно, уравнение (2) лучше соответствует измеренным значениям при малом уровне интенсивности эхосигнала.

Расчеты S_v по соотношениям (1) и (2) содержат определенные практические тонкости, которые детально представлены в [38] и [39] соответственно. На рис. 2б приведен пример профиля интенсивности эхосигнала на втором шаге обработки по [38], серые точки – исходные данные, черная линия – осредненные по 4 лучам во вто-

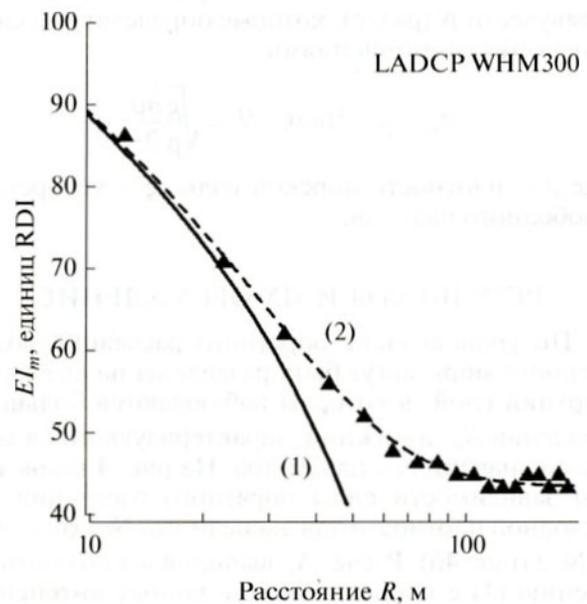


Рис. 3. Сопоставление соотношений (1) и (2), треугольники – измеренные значения EI_m .

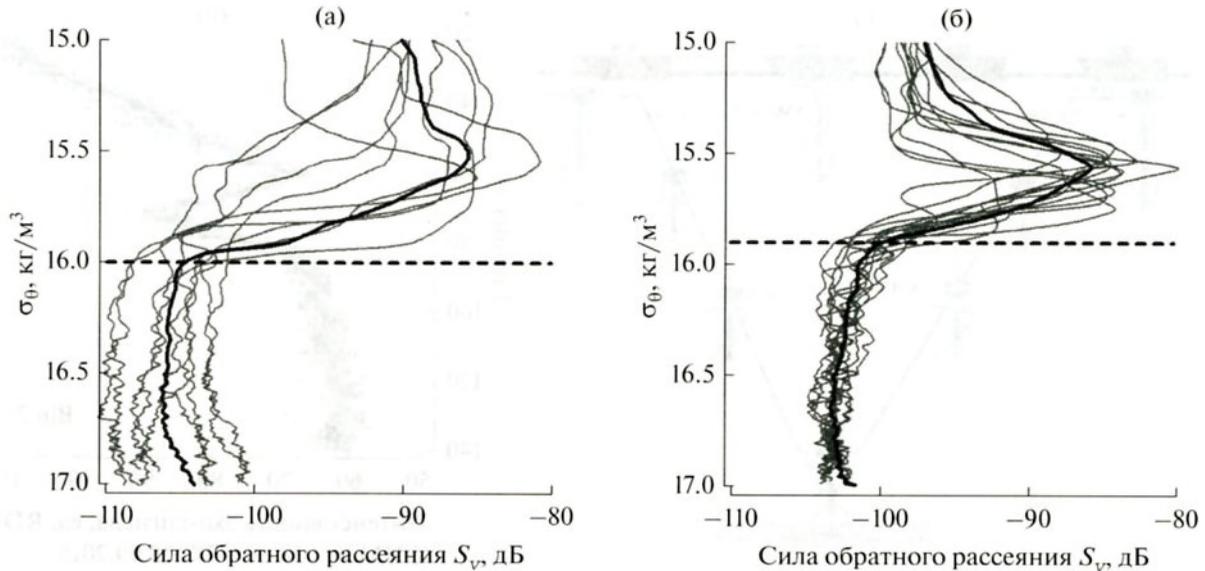


Рис. 4. Зависимость силы обратного рассеяния на нижней границе деятельного слоя Черного моря от условной плотности в мае 2004 г. (а) и в июле 2007 г. (б).

ром сегменте глубины, удаленном от преобразователей прибора на 10 м.

В рамках данной работы использованы следующие обозначения акустических параметров: m_v (м^{-1}) – коэффициент обратного рассеяния [40]; $M_{z_1-z_2} = \int_{z_1}^{z_2} m_v dz$ – сила слоя [40]. Первая величина связана с силой обратного рассеяния соотношением $S_v = 10 \lg(m_v/4/\pi)$ [41]. Также в работе использованы следующие термины из океанологии: условная плотность σ_θ ($\text{кг}/\text{м}^3$) и частота плавучести N ($\text{рад}/\text{с}$), которые определяются следующими соотношениями:

$$\sigma_\theta = \rho - 1000, \quad N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}},$$

где ρ – плотность морской воды, g – ускорение свободного падения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По уровню силы обратного рассеяния воды Черного моря могут быть разделены на два слоя: верхний слой, в котором наблюдаются большие значения S_v , и нижний, характеризующийся малыми значениями параметра. На рис. 4 приведены зависимости силы обратного рассеяния от условной плотности для экспедиций № 1 (рис. 4а) и № 2 (рис. 4б). Расчет S_v выполнялся по соотношению (1) с использованием данных интенсивности эхосигнала во втором сегменте глубины, отстоящим от преобразователей прибора на фиксированном расстоянии около 10 м. На графиках

серые линии представляют зависимости на отдельных станциях, черная жирная линия – изопикнически осредненная по ансамблю станций зависимость, черная пунктирная линия – граница раздела слоев ($\sigma_\theta = 16 \text{ кг}/\text{м}^3$ в 2004 г., $\sigma_\theta = 15.9 \text{ кг}/\text{м}^3$ в 2007 г.).

Приведенная зависимость силы обратного рассеяния от условной плотности имеет простую интерпретацию. На частоте 307 кГц основным источником рассеяния звука является зоопланктон, среда обитания которого ограничивается верхним слоем моря с наличием растворенного кислорода. По современным представлениям в Черном море нижняя граница субкислородной зоны, где концентрация кислорода уменьшается до порога обнаружения, проходит при $\sigma_\theta = 15.9 \dots 16 \text{ кг}/\text{м}^3$ [42], что совпадает с положением границы раздела рассматриваемых слоев. Небольшое различие положения границы для двух экспедиций объясняется тем, что экспедиция 2004 г. проходила в районе антициклонического вихря, в котором за счет усиления диапикнического обмена увеличивается глубина проникновения растворенного кислорода [43]. В нижнем слое Черного моря ($\sigma_\theta > 16 \text{ кг}/\text{м}^3$) наличие сероводорода исключает существование живых организмов, и сила обратного рассеяния звука определяется наличием взвешенного вещества, сернистых анаэробных бактерий и микромасштабных неоднородностей водной среды, создаваемых процессами турбулентного перемешивания.

На рис. 5 приведены профили силы обратного рассеяния (черные сплошные линии) на нескольких, наиболее глубоководных, станциях экспеди-

ции № 1. Черные пунктирные линии представляют профили силы обратного рассеяния на микроструктурных неоднородностях водной среды, рассчитанные по упрощенному соотношению для частоты 307 кГц:

$$10^{S_v/10} = 2.2 \times 10^{-8} \frac{\partial \rho}{\partial z} (\sqrt{\epsilon^*} + 0.08) \times \exp(-0.04/\sqrt{\epsilon^*}), \quad (3)$$

где $\epsilon^* = \epsilon/\nu$; ϵ – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии (Вт/кг); $\nu = 1.3 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – молекулярная вязкость воды.

Формула (3) получена из соотношений, приводимых в [44] с учетом следующих замечаний: для частот больше 100 кГц основной причиной обратного рассеяния является турбулентность в диапазоне вязкой конвекции [45]; на частоте 307 кГц микроструктурные неоднородности солености играют доминирующую роль в формировании эхосигнала [46, 47].

Расчет S_v производился для двух значений ϵ , 10^{-10} и 10^{-9} Вт/кг, с использованием реальных профилей гидрологических параметров. Выбранные значения ϵ приблизительно соответствуют ее значениям в Черном море [48, 49]. Приведенные материалы показывают, что процессы турбулентного перемешивания не играют существенной роли в формировании силы обратного рассеяния на частоте 307 кГц в нижнем слое моря. Вследствие малых размеров бактерий наиболее вероятно, что доминирующей причиной рассеяния звука на частоте 307 кГц в нижнем слое Черного моря является взвешенное вещество, относительно равномерно распределенное по глубине.

Как отмечалось, в Черном море наиболее хорошо выраженный ЗРС наблюдается в светлое время суток [10, 11, 16]. В подавляющем большинстве случаев профили коэффициента обратного рассеяния, полученные в экспедициях № 1 и 2, имеют один хорошо выраженный максимум, соответствующий центру слоя.

На рис. 6а приведены профили коэффициента обратного рассеяния m_v , полученные в экспедиции № 1 на станциях, выполненных в дневное время в глубоководной части моря за пределами антициклонического вихря [27]. Глубина залегания максимума m_v меняется от станции к станции в диапазоне 80–120 м. В окрестности максимума профили хорошо воспроизводятся гауссовым распределением (4) с шириной окна h от 3 до 7 м. Вследствие значительной продолжительности зондирующего импульса (~4 м) полученные оценки ширины окна будут превышать фактическую ожидаемую ширину звуко рассеивающего слоя (1–3 м):

$$m_v(z) = m_v(\text{max}) \exp(-1/2((z - z_{\text{max}})/h)^2). \quad (4)$$

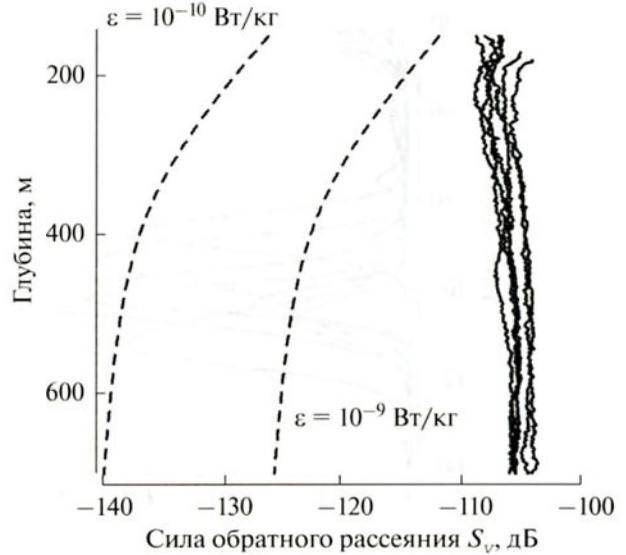


Рис. 5. Измеренные профили силы обратного рассеяния (сплошные линии) и профили, рассчитанные для разных значений ϵ (пунктирные линии).

На рис. 6б приведены зависимости m_v от условной плотности σ_θ для тех же станций. Как видно, ГРС имеет тенденцию располагаться на фиксированной изопикне. Сопоставление двух частей рис. 6 показывает, что дневной ЗРС имеет ту же тенденцию, что свойственно большинству химических и биологических параметров вод Черного моря вследствие его сильной плотностной стратификации [42]. Нижняя шкала на рис. 6 выражает m_v в единицах эквивалентной концентрации копепод (K , экз/м³) с характерной длиной 2 мм, рассчитанной по модели [5], как это представлено в [47].

На рис. 7а приведены изопикнически осредненные по ансамблю станций профили коэффициента обратного рассеяния m_v , эквивалентной концентрации K , температуры T и условной плотности σ_θ для экспедиции 2004 г. На рис. 7б приведены изопикнически осредненные по ансамблю станций зависимости тех же параметров и частоты плавучести N от условной плотности. В среднем, дневной ЗРС располагается на 40 м ниже слоя холодных промежуточных вод и на 20 м ниже основного пикноклина. Заныривание зоопланктона для “отдыха” под слой скачка плотности является характерным для копеподы. Силы плавучести ограничивают проникновение более крупных хищников в слой, где копепода находится в состоянии диапаузы, что спасает зоопланктон от поедания [50].

Центр ЗРС соответствует значению условной плотности $\sigma_\theta = 15.5 \text{ кг/м}^3$. В Черном море при $\sigma_\theta = 15.4\text{--}15.7 \text{ кг/м}^3$ наблюдается максимум кон-

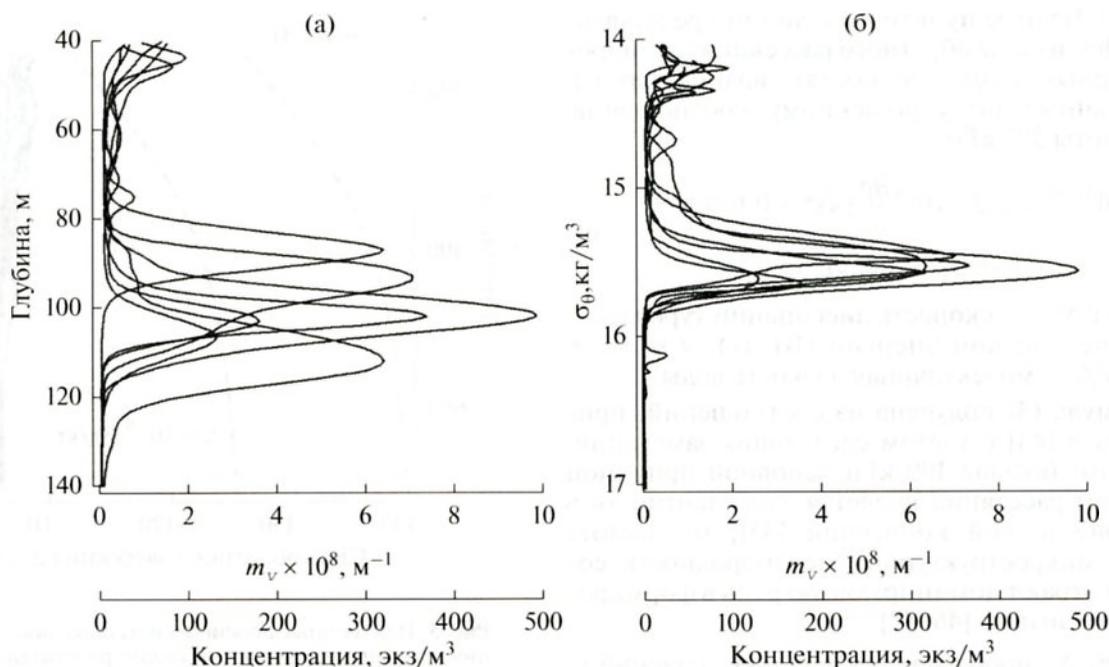


Рис. 6. Профили коэффициента обратного рассеяния на отдельных станциях (а) и его зависимости от условной плотности на тех же станциях (б).

центрации нитратов [42]. Совпадение положения звуко рассеивающих слоев с максимумом концентрации нитратов позволяет сделать предположение об их возможной взаимосвязи. Следуя рассуждениям [51], мигрирующий зоопланктон в ночное время потребляет органические вещества преимущественно 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^- .

Материалы экспедиций 2004 и 2007 гг. показали, что центр дневного ЗРС располагается в диапазоне значений σ_θ 15.4–15.8 $\text{кг}/\text{м}^3$. На рис. 8 приведена результирующая зависимость эквивалентной концентрации в максимуме от условной плотности (треугольники – 2004 г., кружки – 2007 г.). Полученные результаты хорошо согласуются с имеющимися представлениями о вертикальном распределении мигрирующего зоопланктона в Черном море в светлое время суток [10, 11]: копепода проводит дневное время в оксиклине и/или в субкислородной зоне при концентрациях растворенного кислорода 25–35 $\mu\text{M O}_2$, образуя слой шириной 1–3 м [52]; хетогната мигрирует в дневное время от поверхности до оксиклина и/или субкислородной зоны, образуя более широкий слой над слоем дневного обитания копеподы.

В Черном море вертикальное распределение растворенного кислорода устойчиво связано с распределением плотности. В настоящее время разделяют три зоны: кислородная – от поверхности до $\sigma_\theta = 14 \text{ кг}/\text{м}^3$, концентрация 250–350 $\mu\text{M O}_2$; ниже следует оксиклин до $\sigma_\theta = 15.5\text{--}15.6 \text{ кг}/\text{м}^3$, концентрация в его нижней части уменьшается до 10–20 $\mu\text{M O}_2$; под ним располагается субкислородная зона, где концентрация кислорода медленно уменьшается до порога обнаружения при $\sigma_\theta = 15.9\text{--}16 \text{ кг}/\text{м}^3$ [42]. В районах проведения исследований в 64% случаев звуко рассеивающий слой обнаруживается на нижней границе оксиклина ($\sigma_\theta = 15.5\text{--}15.6 \text{ кг}/\text{м}^3$), в 20% случаев – в субкислородной зоне ($\sigma_\theta = 15.6\text{--}15.8 \text{ кг}/\text{м}^3$), в 16% случаев – в оксиклине ($\sigma_\theta = 15.4\text{--}15.5 \text{ кг}/\text{м}^3$). Наблюдаемая изменчивость эквивалентной концентрации в максимуме (среднее по ансамблю 250, с.к.о. 120) определяется неоднородностью пространственного распределения зоопланктона.

Экспедиция № 3, проходившая в сентябре 2008 г., охватила значительную часть Черного моря вблизи побережья Крыма. В данной статье использованы два фрагмента записи судового VMADCP (154 кГц). На рис. 9а приведено пространственное распределение силы обратного рассеяния в зависимости от глубины и расстояния вдоль разреза. Расчет S_v производился по соотношению (2). Отметим, что авторам недоступны результаты тестирования прибора, что, воз-

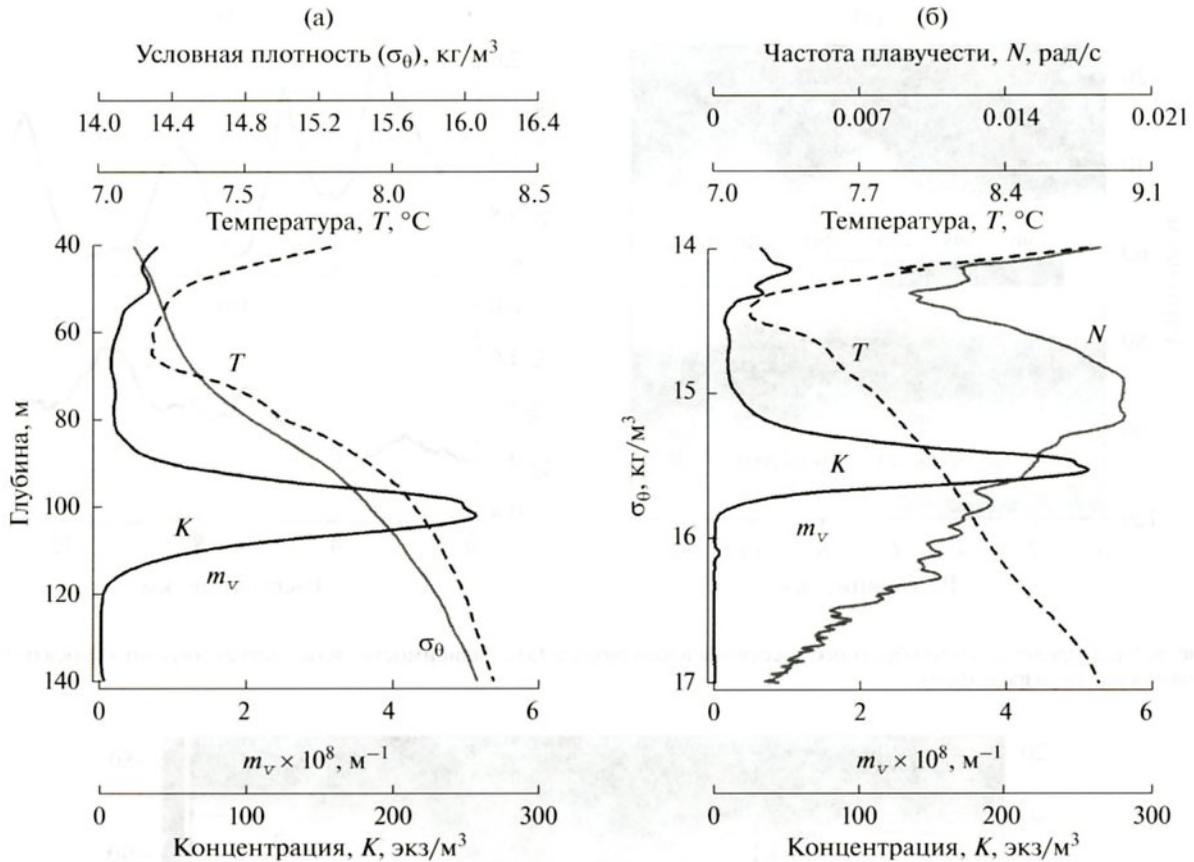


Рис. 7. Профили температуры, условной плотности, коэффициента обратного рассеяния и эквивалентной концентрации (а) и их зависимости от условной плотности (б).

можно, приведет к некоторым дополнительным погрешностям определения силы обратного рассеяния. Распределение показывает наличие нескольких звукорассеивающих слоев, которые можно разделить по глубине: первый 15–25 м, второй 25–50 м, третий 75–105 м, четвертый 110–120 м.

Наиболее выразительно горизонтальная изменчивость проявляется во втором слое (рис. 9б). Слой залегает непосредственно под сезонным термоклином и предположительно формируется хетогнатой. Характерные горизонтальные масштабы пульсаций силы слоя составляют 3–4 км и соответствуют масштабам изменчивости поля скорости течений в районе измерений [30]. По амплитуде сила слоя колеблется от 0.4 до 2. Третий слой предположительно формируется копендой и обнаруживается в диапазоне условной плотности 15.4–15.7 кг/м³, с максимумом S_v при $\sigma_\theta = 15.5$ кг/м³. По диапазону плотностей этот слой соответствует наблюдавшемуся в 2004 и 2007 гг. Сила слоя в зависимости от расстояния вдоль разреза приведена на рис. 9в. В соответствии с [10] самый нижний слой формируется копендой, находящейся в состоянии диапаузы в субкислородной зоне на протяжении дневного и ночного вре-

мени суток. По мнению авторов, этот слой формируется отмершими морскими организмами, опускающимися в глубины вод.

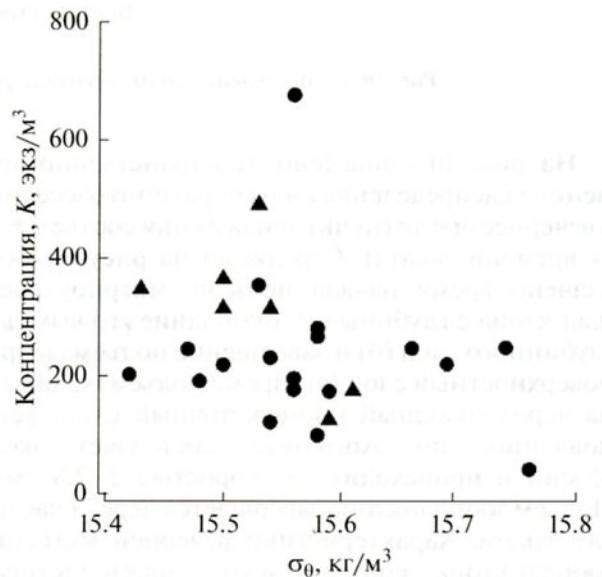


Рис. 8. Зависимость максимума эквивалентной концентрации от условной плотности.

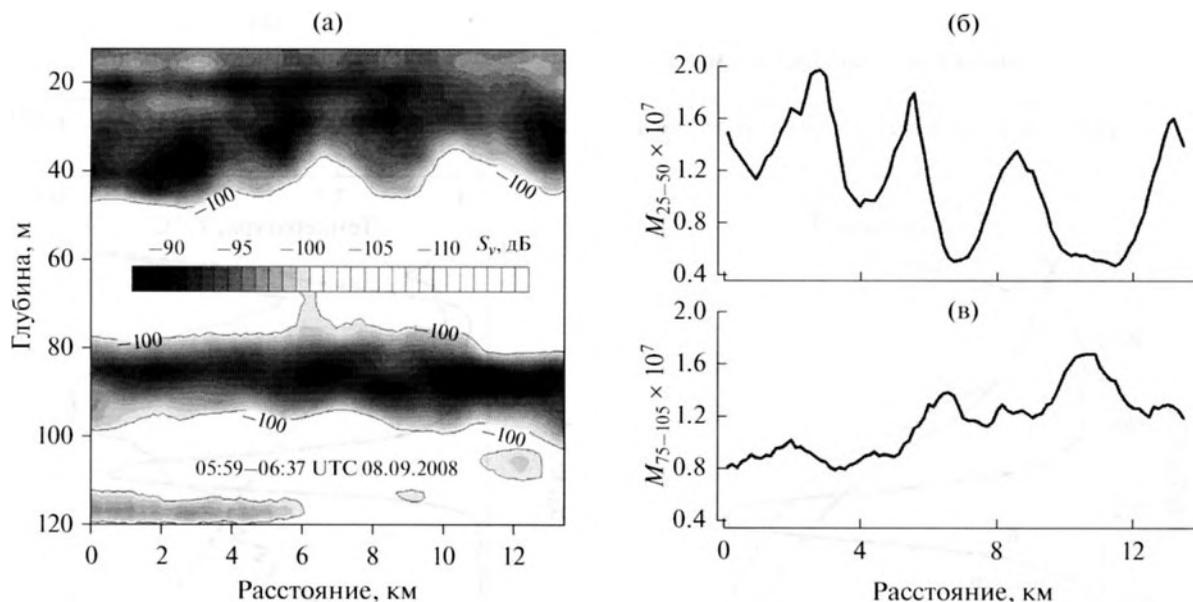


Рис. 9. Распределение силы обратного рассеяния вдоль разреза (а) и зависимости силы соответствующих слоев от расстояния вдоль разреза (б, в).

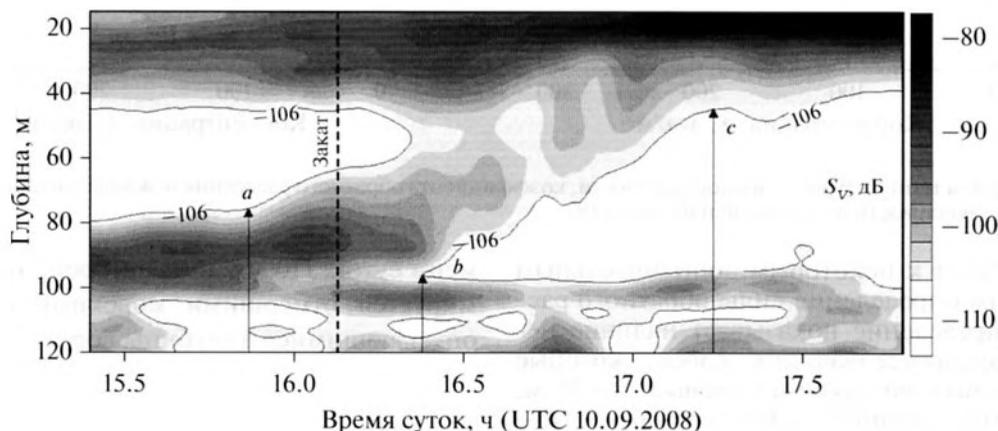


Рис. 10. Распределение силы обратного рассеяния во время вечерней миграции планктона.

На рис. 10 приведено пространственно-временное распределение силы обратного рассеяния в вечернее время (пунктирная линия соответствует времени заката). Стрелками на рисунке обозначено время начала подъема мигрирующего планктона с глубины (а), окончание его выхода с глубинного слоя (б) и завершение подъема в приповерхностный слой (в). Время подъема планктона через холодный промежуточный слой, установленное по эхограмме, составляет около 45 мин и происходит со скоростью 2–2.8 см/с. Подъем зоопланктона завершается через 1 час после заката. Характеристики вечерней миграции зоопланктона соответствуют характеристикам миграционного цикла *S. euxinus* [10] и подтверждают доминирование копеподы в формиро-

вании дневного ЗРС в районе проведения измерений. В ночное время на глубине 100 м наблюдается ослабленный ЗРС (см. также рис. 2б), что определяется сезонной изменчивостью возрастного состава копеподы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения, выполненные в ходе экспедиций 2004–2008 годов, показали хорошее соответствие полученных результатов с имеющимися представлениями о распределении и поведении звукорассеивающего зоопланктона в Черном море. Использование ADCP позволило установить характерные глубины залегания дневного ЗРС относительно распределения гидрологических параметров и ха-

рактерные горизонтальные масштабы неоднородности распределения зоопланктона в районе наблюдений. По характеристикам вечерней миграции зоопланктона установлено, что дневной ЗРС в сентябре преимущественно формируется копейкой *C. euxinus*.

ADCP представляется полезным инструментом при проведении биологических измерений и после выполнения соответствующих калибровочных сличений может быть использован для получения количественной оценки биомассы зоопланктона в ЗРС [22]. Данные ADCP по интенсивности эхосигнала могут быть полезны для наведения сеточных тралений при выполнении биологических станций, что особенно актуально в районах взаимодействия экосистем шельфовой и глубоководной частей моря, где характеристики дневного ЗРС претерпевают значительные изменения [27].

Авторы выражают признательность независимым рецензентам, высказавшим конструктивные замечания в отношении первой редакции статьи.

Работа выполнена в рамках проекта МГИ РАН "Оперативная океанография" и при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы" (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0110).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Eyring C.F., Christensen R.J., Raitt R.W.* Reverberation in the Sea // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1948. V. 20. P. 462–475.
2. *Андреев М.Ю., Андреева И.Б.* О физической природе многолучевой реверберации в океане / *Акустика океанской среды*. Под ред. Бреховских Л.М., Андреевой И.Б. М.: Наука, 1989. С. 79–88.
3. *Андреева И.Б.* Звукорассеивающие слои – акустические неоднородности толщи вод океана // *Акуст. журн.* 1999. Т. 45. № 4. С. 437–444.
4. *Андреева И.Б., Тарасов Л.Л.* Акустические свойства морских организмов, образующих звукорассеивающие слои океана // *Акуст. журн.* 2003. Т. 49. № 3. С. 318–324.
5. *Stanton T.K., Wiebe P.H., Chu D., Benfield M.C., Scanlon L., Martin L., Eastwood R.L.* On acoustic estimates of zooplankton biomass // *ICES J. Marine Sci.* 1994. № 54(4). P. 505–512.
6. *Токарев Ю.Н.* Гидроакустические характеристики деятельного слоя и их связь с составом и обилием планктона / *Планктон Черного моря*. Ред. Ковалёв А.В., Финенко З.З. Киев: Наукова думка, 1993. С. 205–215.
7. *Токарев Ю.Н.* Основы биофизической экологии гидробионтов. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 342 с.
8. *Сибирцова Е.Н.* Особенности вертикального распределения фауны звукорассеивающих слоев в Черном море в осенний период // *Наукові записки Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біологія*. 2010. № 3(44). С. 234–237.
9. *Сибирцова Е.Н., Токарев Ю.Н.* Районирование морей Средиземноморского бассейна по акустическим характеристикам верхнего продуктивного слоя // *Морський екологічний журнал*. 2010. Т. 9. № 3. С. 63–76.
10. *Mutlu E.* Acoustic identification of the concentration layer of copepod species, *Calanus euxinus* // *Marine biology*. 2003. V. 142. P. 517–523.
11. *Mutlu E.* Diel vertical migration of *Sagitta setosa* as inferred acoustically in the Black Sea // *Marine biology*. 2006. V. 149. № 3. P. 573–584.
12. *Виноградов М.Е., Сапожников В.В., Шушукина Е.А.* Экосистема Черного моря. М.: Наука, 1992. 112 с.
13. *Yuneva T.V., Svetlichny L.S., Yunev O.A., Romanova Z.A., Kideys A.E., Bingel F., Uysal Z., Yilmaz A., Shulman G.E.* Nutritional condition of female *Calanus euxinus* from cyclonic and anticyclonic regions of the Black Sea // *Marine Ecology Progress Series*. 1999. V. 189. P. 195–204.
14. *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. Plankton Res.* 2000. V. 22. № 4. P. 669–683.
15. *Erkan F., Gucu A.C., Zagorodnyaya J.* The diel vertical distribution of zooplankton in the Southeast Black Sea // *Turkish J. Zoology*. 2000. № 24. P. 417–427.
16. *Marinova V., Stefanova K.* Spatial distribution and migration of sound scattering layers and zooplankton in front of Bulgarian Black sea coast // *Proc. Space, ecology, nanotechnology, safety: 5th Sci. Conf. with Int. Participation*. Sofia, Bulgaria, 2009. P. 223–228.
17. *Holliday D.V., Pierer R.E.* Volume scattering strengths and zooplankton distribution at acoustic frequencies 0.5 and 3 MHz // *J. Acoust. Soc. Am.* 1980. V. 67. P. 135–146.
18. *Wiebe P.H., Mountain D.G., Stanton T.K., Greene C.H., Lough R.G., Kaartvedt S., Dawson J., Copley N.J.* Acoustical study of the spatial distribution of plankton on Georges Bank and the relationship between volume backscattering strength and taxonomic composition of the plankton // *Deep-Sea Res.* 1996. Part II. V. 43. Iss. 7–8. P. 1971–2001.
19. *Sutor M., Cowles T.J., Peterson W.T., Lamb J.* Comparison of acoustic and net sampling systems to determine patterns in zooplankton distribution // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. Iss. C10S16. P. 1–11.
20. *Ostrovskii A., Zatsepin A.* Short-term hydrophysical and biological variability over the northeastern Black Sea continental slope as inferred from multiparametric tethered profiler surveys // *Ocean Dynamics*. 2011. № 61. P. 797–806.
21. *Андреева И.Б., Галыбин Н.Н., Тарасов Л.Л.* О вертикальной структуре акустических характеристик звукорассеивающих слоев океана // *Акуст. журн.* 2000. Т. 46. № 5. С. 581–587.
22. *Flagg C.N., Smith S.L.* On the use of the acoustic Doppler current profiler to measure zooplankton abundance // *Deep-Sea Res.* 1989. Part A. V 36. Iss. 3. P. 455–474.
23. *Сабитин К.Д., Серебряный А.Н.* Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 5. С. 639–648.

24. Гончаров В.В., Иванов В.Н., Кочетов О.Ю., Курьянов Б.Ф., Серебряный А.Н. Акустическая томография на шельфе Черного моря // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 614–622.
25. 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 Res. Part II. 2008. V. 55. Iss. 20–21. P. 2275–2284.
26. 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 Res. Part I. 2010. V. 57. Iss. 1. P. 78–94.
27. Морозов А.Н., Лемешко Е.М. Характеристики звуко-рассеивающего слоя Черного моря по данным LADCP-наблюдений // Морской гидрофиз. журн. 2013. № 4. С. 41–50.
28. Лемешко Е.М., Морозов А.Н., Станичный С.В., Мее Л.Д., Shapiro G.I. Вертикальная структура поля скорости течений в северо-западной части Черного моря по данным LADCP в мае 2004 г. // Морской гидрофиз. журн. 2008. № 6. С. 25–37.
29. Морозов А.Н., Лемешко Е.М. Придонный пограничный слой на шельфе Южного берега Крыма по данным наблюдений // Системы контроля окружающей среды. 2009. С. 270–272.
30. Джиганишин Г.Ф., Полонский А.Б. Кинематическая структура и мезомасштабная изменчивость Основного Черноморского течения вблизи побережья Крыма (по данным инструментальных измерений в сентябре 2008 г.) // Морской гидрофиз. журн. 2011. № 1. С. 25–35.
31. Polzin K., Kunze E., Hummon J., Firing E. The Finescale response of Lowered ADCP Velocity Profiles // J. Atmos. Ocean. Tech. 2002. V. 19. P. 205–224.
32. Fer I. Scaling turbulent dissipation in Arctic fjord // Deep-Sea Res. Part II. 2006. V. 53. Iss. 1–2. P. 77–95.
33. Gaardsted F., Meng Zhou M., Pavlov V., Morozov A., Tande K.S. Mesoscale distribution and advection of overwintering *Calanus finmarchicus* off the shelf of northern Norway // Deep-Sea Res. Part I. 2010. V. 57. Iss. 11. P. 1465–1473.
34. Firing E. Lowered ADCP developments and use in WOCE // WOCE Newsletter. 1998. № 30. P. 10–13.
35. Firing E., Gordon R. Deep ocean acoustic Doppler profiling / Proc. IEEE 4th Working Conf. in Current Measurements. Clinton, MD, 1990. P. 192–201.
36. Fisher J., Visbeck M. Deep velocity profiling with self-contained ADCPs // J. Atmos. Ocean. Tech. 1993. V. 10. P. 764–773.
37. Visbeck M. Deep velocity profiling using Lowered Doppler Current Profilers: bottom track and inverse solutions // J. Atmos. Ocean. Tech. 2002. V. 19. P. 794–807.
38. Deines K.L. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profiler // Proc. IEEE 6th Working Conf. on Current Measurement Technology. San Diego, California, 1999. P. 259–264.
39. Морозов А.Н., Лемешко Е.М. Оценка концентрации взвеси по данным ADCP WHM1200 // Системы контроля окружающей среды. 2010. № 14. С. 42–46.
40. Андреева И.Б. Физические основы распространения звука в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 192 с.
41. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
42. Yakushev E.V., Chasovnikov V.K., Murray J.W., Pakhomova S.V., Podymov O.I., Stunzhas P.A. Vertical hydrochemical structure of the Black Sea / The Handbook of Environmental Chemistry. Ed. A.G. Kostianoy, A.N. Kosarev. Berlin-Heidelberg: Springer, 2008. V. 5Q. P. 277–307.
43. Кондратьев С.И., Романов А.С., Внуков Ю.Л. Особенности распределения гидрохимических характеристик в районе материкового склона северо-западной части Черного моря // Морской гидрофиз. журн. 2007. № 5. С. 69–79.
44. Seim H.E., Gregg M.C., Miyamoto R.T. Acoustic backscatter from turbulent microstructure // J. Atmos. Ocean. Technol. 1995. V. 12. P. 367–380.
45. Goodman L. Acoustic scattering from oceanic microstructure // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. Iss. C7. P. 11557–11573.
46. Seim H.E. Acoustic backscatter from salinity microstructure // J. Atmos. Ocean. Tech. 1999. V. 16. P. 1491–1498.
47. Ross T., Lueck R. Sound scattering from oceanic turbulence // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. (6). 1344. doi 10.1029/2002GL016733
48. Зацепин А.Г., Голенко Н.Н., Корж А.О., Кременецкий В.В., Пака В.Т., Поярков С.Г., Стунжас П.А. Влияние динамики течений на гидрофизическую структуру вод и вертикальный обмен в дельтовом слое Черного моря // Океанология. 2007. Т. 47. № 3. С. 327–339.
49. Морозов А.Н., Лемешко Е.М. Оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по данным STD/LADCP-измерений в северо-западной части Черного моря в мае 2004 года // Морской гидрофиз. журн. 2014. № 1. С. 58–67.
50. Loeng H., Drinkwater K. An overview of the ecosystem of the Barents and Norwegian Seas and their response to climate variability // Deep-Sea Res. Part II. 2007. V. 54. Iss. 23–26. P. 12478–2500.
51. Longhurst A.R., Harrison W.G. Vertical nitrogen flux from the oceanic photic zone by diel migrant zooplankton and nekton // Deep-Sea Res. Part A. 1988. V. 35. Iss. 6. P. 881–889.
52. Vinogradov M.Ye., Flint M.V., Shushkina E.A. Vertical distribution of mesoplankton in the open area of the Black Sea // Marine biology. 1985. V. 89. P. 95–107.