

АМПЛИТУДНАЯ КАЛИБРОВКА СИГНАЛА
ОБРАТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ ДОННОГО ADCP
ПО ДЛИННЫМ РЯДАМ ИЗМЕРЕНИЙ© 2017 г. В. Б. Пиотух¹, А. Г. Зацепин¹, С. Б. Куклев²¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия²Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик, Россия

e-mail: vbp@ocean.ru

Поступила в редакцию 05.09.2016 г.

После доработки 09.11.2016 г.

Рассмотрен возможный подход и предварительные результаты амплитудной калибровки сигналов обратного акустического рассеяния ADCP, установленного на дне в ближней шельфовой зоне Черного моря. Цель работы – получение вертикальных профилей уровня сигналов акустического рассеяния, отражающих реальные характеристики объемного содержания взвеси в морской воде в единицах условной акустической мутности для заданной частоты сигнала. При этом используется предположение о наличии в длинных сериях измерений ADCP интервалов максимальной акустической прозрачности и однородности морской среды по вертикали. В рамках этой гипотезы были выделены интервалы минимальных значений сигналов обратного акустического рассеяния, построена эмпирическая передаточная функция приемного тракта ADCP и проведена его калибровка. Были построены скорректированные массивы сигналов обратного акустического рассеяния относительно сигнала от уровня условно “чистой воды”. В результате проведенной калибровки были выявлены новые особенности поведения вертикальных профилей акустического эхо-сигнала. Результаты работы предполагается использовать для последующего анализа вертикальной и временной изменчивости содержания взвешенного вещества в ближней шельфовой зоне Черного моря.

DOI: 10.7868/S0030157417020162

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение ряда лет в шельфовой зоне Черного моря на базе Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ЮО ИО РАН, г. Геленджик) развивается экспериментальный подспутниковый полигон (далее – ЧЭПП), основу которого составляют стационарные автоматизированные станции наблюдений: донные акустические доплеровские профилографы течений (ADCP), заякоренные термокосы [1], мобильные зонды-профилографы “Аквалог” на заякоренных буйковых станциях [4]. Использование стационарных донных ADCP, установленных на глубинах 20–25 м на расстоянии 0.9–1.1 км от береговой линии, позволяет проводить долговременные измерения вертикальных профилей скорости течений, а также амплитуд сигналов обратного акустического рассеяния. Длинные ряды наблюдений (до нескольких месяцев в каждой серии) существенно дополняют и расширяют существующие представления о временной изменчивости характеристик морской среды, включая биолого-экологические характеристики, подверженные влиянию различных внешних факторов.

Пример исследования изменчивости скорости течения с помощью ADCP на ЧЭПП приведен в [2], сравнительные характеристики и особенности используемых приборов при регистрации скорости шельфовых течений рассмотрены в [5]. Для построения полей течений используются доплеровские частотные сдвиги принимаемых сигналов. При этом уровни (амплитуды) принимаемых акустических сигналов не анализировались. Представленные на рынке ADCP не предназначены для количественных измерений концентрации взвеси, в них отсутствует привязка уровня принимаемого сигнала к единицам объемного акустического рассеяния, что не позволяет использовать ADCP для корректного анализа содержания взвешенного вещества без дополнительной амплитудной калибровки приемного тракта.

Поскольку задача изучения долговременной изменчивости содержания взвеси и ее распределения по вертикали имеет большое значение для биологов и седиментологов, представляется весьма актуальным использовать для этого данные обратного акустического рассеяния донных станций ADCP. Для решения такой задачи требуется

калибровка, связывающая объемное содержание взвеси с амплитудой сигнала обратного акустического рассеяния ADCP.

Величина сигнала обратного акустического рассеяния, в свою очередь, даже при однородном распределении взвеси является функцией расстояния от излучателя и ряда других параметров, включая как параметры среды, так и приборные. Поэтому принципиально важно произвести калибровку прибора, т.е. найти функцию, описывающую ослабление выходного сигнала ADCP с расстоянием от излучателя. Найти эту функцию эмпирически возможно при однородном распределении взвеси по вертикали, хотя в реальных условиях содержание и состав взвеси могут быть разными на различных горизонтах измерений h , т.е. коэффициент объемного обратного рассеяния звука $\sigma_{bs} = \sigma_{bs}(h)$. Чтобы осуществить аппаратно-независимую амплитудную акустическую калибровку сигнала ADCP, требуется выбрать ситуации с однородными профилями взвеси и установить связь значений амплитуды сигнала с постоянным уровнем акустического рассеяния вне зависимости от расстояния до гидрофона. В работе делается попытка найти решение этой задачи (с точностью до постоянных коэффициентов) без привлечения внешних измерительных средств.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

2.1. В качестве измерительного средства в работе использовался прибор AWAC Sensor Continental 1000 кГц фирмы Nortek (далее – AWAC) [9], который был установлен на глубине 25.4 м вблизи Геленджика на траверзе м. Толстый на расстоянии 1.1 км от береговой линии. Массивы записей сигналов акустического рассеяния AWAC охватывают диапазон дат 01 ноября 2011 г. – 23 сентября 2014 г., состоят из отдельных серий измерений продолжительностью от 12 до 170 сут, проведенных в различные сезоны года и чередующихся с интервалами пропусков измерений. Общий объем записей составил около 90 тыс. вертикальных профилей компонент скоростей течения и амплитуд рассеянных сигналов с временным шагом от 10 до 20 мин. Каждый профиль получен путем усреднения данных 5–7 импульсных посылок (pings per burst) с шагом 2 Гц.

Примеры регистрограмм сигналов AWAC и графиков временной изменчивости уровня сигнала в выделенных диапазонах глубин в единицах Nortek приведены на рис. 1.

Присутствуют значительные вариации уровня сигнала по времени, представляющие интерес с точки зрения предварительной оценки изменчивости содержания взвешенного вещества в воде и влияния внешних факторов. Однако – из-за от-

сутствия калибровки сигнала по глубине – нет возможности построить вертикальные профили коэффициента обратного рассеяния, в т.ч. оценить относительный вклад рассеяния в верхних и придонных слоях моря. Пунктирная линия на уровне сигнала 20 единиц (counts) соответствует выходному сигналу AWAC до погружения прибора в воду, т.е. в отсутствие сигнала рассеяния. Это значение можно условно принять как уровень собственных шумов приемного тракта, либо как некую постоянную “шумовую подставку”, связанную с уровнем шумов акустического приемника. В слое 3...6 м от поверхности минимальные значения сигнала составляют 22–23 единиц (counts), т.е. условно предполагаемое отношение “сигнал/шум” S_N составляет около 1.1–1.15 условных единиц, а на горизонтах 19–22 м значения выходного сигнала очень значительно (на 40–80 единиц) превышают пороговый уровень.

В релизе фирмы Nortek [14] рекомендован следующий порядок действий при оценках содержания взвеси с помощью акустических доплеровских измерителей:

1. Переход от внутренних единиц (counts) к линейной или логарифмической шкале.

2. Калибровка по дальности (range normalization) – устранение зависимости полученных данных от глубины измерений (или вдольлучевой дальности).

3. Калибровка прибора (instrument normalization) – устранение зависимости полученных данных от особенностей инструмента измерений. Поскольку существующие доплеровские измерители изначально не предназначались для абсолютной калибровки выходного сигнала, от проведения последнего этапа работы рекомендуется воздержаться.

Мы намерены показать, что при определенных условиях возможно проведение эмпирической сквозной калибровки тракта акустического сигнала в относительных единицах, включая как дальностную, так инструментальную калибровку, без привлечения внешних измерительных средств.

2.2. Приведем основные энергетические соотношения, связывающие уровень принимаемого акустического сигнала с расстоянием от гидрофона и уровнем объемного акустического рассеяния в водной среде. Базовое энергетическое уравнение гидролокации обычно записывают в виде (2.1) или его близких аналогов [6, 7, 10, 12]:

$$EL = SL - 2TL + TS, \quad (2.1)$$

где EL (Echo Level) – уровень полезного сигнала, SL (Source Level) – уровень излучения, TL (Transmission Loss) – потери в тракте передачи-приема сигнала, TS (Target Strength) – “сила цели”. Все величины выражаются в логарифмических единицах – децибелах, например, $SL = 10 \lg(P_{D_{BW}})$,

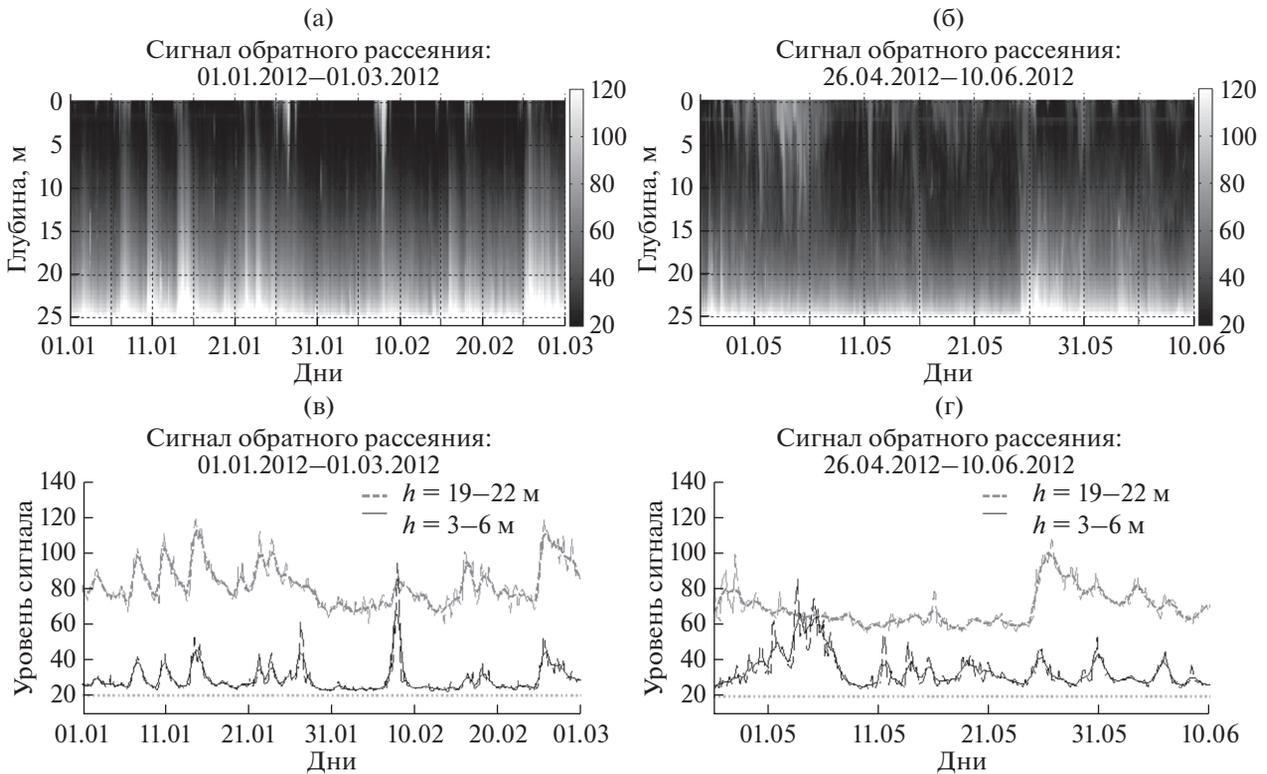


Рис. 1. Примеры регистрограмм сигнала обратного акустического рассеяния (а, б) и графики значений сигнала обратного акустического рассеяния в слоях 3–6 м и 19–22 м (в, г) в зимнюю (а, в) и весеннюю (б, г) серии измерений 2012 г. Шкала значений и яркости – в единицах выходных сигналов AWAC (counts). Данные с 3-х часовым усреднением.

где P_{DBW} – мощность излучателя, Вт. Это уравнение является наиболее общим для моностатической схемы локации (приемник пространственно совмещен с передатчиком). Дополнительно в энергетические уравнения часто вводят дополнительные параметры, связанные с коэффициентами направленного действия передающей и приемной антенн, уровнем шумов, пороговым уровнем принимаемого сигнала, длительностью излучаемого импульса, температурой, а также дополнительную калибровочную константу.

В случае объемного акустического рассеяния вместо “силы цели” используется термин “сила обратного рассеяния” на заданной частоте, которая обычно определяется как $S_v = 10 \lg(\sigma_{bs})$, где σ_{bs} – коэффициент объемного обратного рассеяния звука на заданной частоте – отношение акустической мощности, рассеянной единичным объемом в единичный телесный угол, к интенсивности падающей волны.

Концентрация взвешенного вещества SSC (Suspended Sediment Concentration), согласно [16], зависит от силы обратного рассеяния S_v как

$$SSC = 10^{(AS_v + B)} = b \times 10^{(AS_v)}, \quad (2.2)$$

где A, B – константы, зависящие от частоты звука, состава взвешенного вещества и температуры.

Для частоты 0.614 МГц в [16] было получено значение $A \sim 0.034$, $b = 1.033$. Переходя к натуральным логарифмам и ограничиваясь малыми значениями степенного параметра и линейным членом разложения, получим

$$SSC = b \exp(2.3AS_v) \sim b(1 + 0.078S_v) \text{ [мг/л]}, \quad (2.3)$$

т.е. концентрация взвешенного вещества с точностью до эмпирических коэффициентов при малом объемном рассеянии прямо пропорциональна силе обратного рассеяния S_v , однако, при увеличении рассеяния зависимость становится нелинейной.

В релизе Nortek [14] приведена следующая зависимость уровня акустического эхо-сигнала от свойств рассеивающей среды:

$$EL = Amp \times 0.43 + 20 \lg(R) + 2\alpha_w R + 20R \int \alpha_p dr, \quad (2.4)$$

где Amp – регистрируемая амплитуда эхо-сигнала, R – расстояние вдоль акустического луча до исследуемого объема, α_w – потери за счет поглощения звука в морской среде, α_p – потери за счет рассеяния на частицах взвеси. Второй член в правой части (2.3) компенсирует геометрическое ослабление эхо-сигнала за счет расходимости лу-

ча, третий – двукратное прохождение звука в поглощающей среде с коэффициентом поглощения α_w . Последний член учитывает ослабление звука за счет рассеяния на частицах взвеси, при малых концентрациях взвеси он может не учитываться. В результате ожидается получение значений EL как объективного индикатора обратного рассеяния в зависимости от значений сигнала Amp .

Наиболее часто цитируемое выражение силы обратного объемного рассеяния S_v имеет вид [11]:

$$S_v = C + 10\lg((T + 273.16)R^2) - P_{DBW} - L_{DBM} + 2\alpha R + K_c(E - E_r), \quad (2.5)$$

где C – калибровочная константа, T – температура приемника, °C, P_{DBW} – излучаемая мощность, Вт, L_{DBM} – длина импульса, м, α – коэффициент поглощения в воде, зависящий от частоты сигнала, солености, температуры, дБ/м, K_c – пересчетный коэффициент, дБ/counts, E – уровень выходного сигнала, которой обычно обозначают как $E = RSSI$ (Received Signal Stress Indicator), выражаемое во внутренних единицах (counts), E_r – уровень шумового сигнала, обозначим ее далее как “шумовая подставка”.

Выражая величину принимаемого сигнала через силу обратного рассеяния, объединяя постоянные члены и опуская зависимость от температуры, можно записать

$$RSSI - E_r = 1/K_c \times (S_v) - 1/K_c \times (20\lg(R) + 2\alpha \times R - C), \quad (2.6)$$

т.е. уровень выходного эхо-сигнала $RSSI$ пропорционален силе обратного объемного рассеяния S_v и имеет детерминированную зависимость от дальности R , коэффициента затухания звука α , и нескольких калибровочных констант, в т.ч. E_r – уровня шумового сигнала. В выражениях (2.4–2.6) предполагается жесткая логарифмическая характеристика приемного тракта ADCP с коэффициентом пропорциональности K_c (дБ/counts), а уровень шумов E_r предполагается учитывать как постоянную аддитивную добавку к значениям выходного сигнала ADCP. Согласно [14] сигнал $RSSI$ практически линеен в диапазоне 70 дБ с точностью 1–2 дБ с пересчетным коэффициентом ~0.45, с возможными вариациями в диапазоне 0.40–0.47. Согласно [11] пересчетный коэффициент $K_c \sim 0.45$ дБ/counts с возможными вариациями в диапазоне 0.35–0.55.

Использование различных форм уравнений эхолокации для оценки силы обратного рассеяния не должно влиять на корректность итоговых результатов. Общими чертами всегда являются: а) учет геометрического фактора – квадратичное ослабление сигнала за счет квазисферической расходимости луча; б) учет значительного поглощения в морской среде при двукратном прохож-

дении трассы (0.4–0.5 дБ/м для частоты 1 МГц [11]); в отдельных случаях учитывается дополнительное ослабление за счет рассеяния на взвеси; в) в контексте решаемой задачи в энергетическое уравнение нередко включают дополнительные члены, как правило, миноритарные, например: зависимость от температуры, ширины импульса, состояния аккумуляторных батарей и т.д. Примеры использования соотношения (2.5) в практике оценок концентрации взвешенного вещества (SSC) по экспериментальным данным, полученным в различных регионах приводятся, например, в работах [3, 10, 12, 13, 16].

В рамках гидроакустического подхода используются логарифмические величины, что имеет свои преимущества – в рассмотрение попадают только существенно значимые переменные параметры, диапазон изменений которых может составлять несколько порядков. Это позволяет исключать из рассмотрения калибровочные константы, не изменяющиеся в конкретной задаче, а также использовать в одном уравнении различные по физической размерности величины (Ватты, метры и т.д.), т.к. они уже нормированы на единицу своей размерности. С другой стороны это означает невозможность получения абсолютной калибровки сигнала ADCP относительно коэффициента объемного рассеяния, т.к. всегда присутствуют эмпирические калибровочные константы, зависящие в т.ч. от привязки используемых параметров к их калибровке в выбранной системе физических единиц.

Отличия предлагаемого здесь подхода от ранее разработанных – используются “длинные” ряды акустических измерений (до несколько месяцев в серии и около 3-х лет в целом) в одной точке, что позволило наблюдать и анализировать широкий набор различных гидрологических ситуаций. Предлагаемый метод первоначально разрабатывался в предположении о неизвестной передаточной характеристике приемного тракта ADCP и является практически аппаратно-независимым. В этом смысле он является альтернативным подходом по отношению к детерминированному методу, предполагающему использование амплитудной калибровки согласно (2.4) или (2.5) и соглашения о достаточной точной логарифмической амплитудной характеристики приемного тракта ADCP.

2.3. Воспользуемся альтернативным методом описания акустических эхо-сигналов, близким к радиолокационному или оптико-локационному подходам, в котором все значимые параметры представляются в виде мультипликативных множителей. Такой метод, хотя и отличается от принятой в гидроакустике традиции, является физически “прозрачным” и используется, например, Шулейкиным [8] при оценке мощности прини-

маемого акустического эхо-сигнала. Отметим, что приводимые ниже соотношения используются лишь для обоснования корректности и оценок пределов применимости конечных выражений (3.7–3.9), а используемая формалистика не является типичной в гидроакустике. Для рассматриваемых небольших дальностей локации, высокой частоты сигналов (1 МГц) и в условиях малой акустической “мутности” воды такой подход представляется корректным. Взаимная эквивалентность уравнений активной локации, представленных в логарифмической и в мультипликативной формах, рассматривается, например, в [15] и не является предметом нашего обсуждения.

Мощность импульсной посылки P_{rec} , отраженной акустической целью на расстоянии r от излучателя и попавшей в апертуру приемника площадью S_{rec} , составляет:

$$P_{\text{rec}}(r) = P_{\text{ref}}(r)S_{\text{rec}}r^{-2}\exp(-\beta r), \quad (3.1)$$

где

$$P_{\text{ref}}(r) = P_S K_{\text{dir}} \Sigma_{\text{tag}} r^{-2} \exp(-\beta r). \quad (3.2)$$

Здесь $P_{\text{ref}}(r)$ – мощность, отраженная от цели в сторону приемника, P_S – мощность излучателя (источника), β – коэффициент ослабления звука вдоль трассы, включающий как поглощение, так и рассеяние, K_{dir} – коэффициент направленного действия излучателя, Σ_{tag} – доля мощности, отраженной целью в сторону приемника (коэффициент обратного рассеяния). В случае локально-сосредоточенной цели, рассматриваемой в [8], $\Sigma_{\text{tag}} = \sigma_{\text{tag}} S_{\text{tag}}$, где S_{tag} – площадь цели, σ_{tag} – удельный площадной коэффициент рассеяния назад, т.е. мощность принимаемого сигнала составила бы

$$P_{\text{rec}}(r) \sim P_S G_{\text{dir}} r^{-4} \exp(-2\beta r) \sigma_{\text{tag}}, \quad (3.3)$$

где G_{dir} – результирующий “геометрический форм-фактор”, в который включены все неизменяемые в конкретном эксперименте константы; мощность принимаемого сигнала ослабевает как $r^{-4} \exp(-2\beta r)$.

В случае объемно-распределенной цели, такой как морская среда, площадь цели увеличивается с ростом расстояния от излучателя как r^2 , т.е.

$$\Sigma_{\text{tag}}(r) = \sigma_{\text{bs}}(r) K_{\text{dir}} r^2 c dt. \quad (3.4)$$

Здесь $K_{\text{dir}} r^2 c dt$ – “засвечиваемый” импульсный объем, c – скорость звука, dt – длительность импульсной посылки ADCP, $\sigma_{\text{bs}}(r)$ – коэффициент объемного обратного акустического рассеяния среды на заданной частоте, поэтому

$$P_{\text{rec}}(r) \sim P_S G_{\text{exp}} r^{-2} \exp(-2\beta r) \sigma_{\text{bs}}(r), \quad (3.5)$$

т.е. мощность сигнала, в отличие от локальной цели, ослабевает как $r^{-2} \exp(-2\beta r)$. Все константы для заданных условий эксперимента вновь объединены в единый мультипликативный форм-

фактор G_{exp} . Зависимость сигнала от расстояния r эквивалентна зависимости от времени Δt , т.к. $r = c\Delta t/2$, где $c \sim 1500$ м/с – скорость звука, $\Delta t \sim 0...36$ мс – интервал времени между моментами излучения и приема сигнала в диапазоне рабочих дальностей AWAC, $r = 0...h/\cos(\theta) \sim 28$ м, где $h \sim 25$ м – глубина установки, $\theta = 25^\circ$ – отклонение лучей AWAC от вертикали.

В диапазоне рабочих дальностей акустического комплекса (1...28 м) множитель r^{-2} изменяется в ~ 780 раз. Ослабление эхо-сигнала за счет поглощения в воде при коэффициенте поглощения звука $\alpha \sim 0.5$ дБ/м для дальности локации $r \sim 28$ м составляет примерно -28 дБ или ~ 630 раз, т.е. итоговое ослабление звука в тракте приема-передачи может достигать $K_{\text{att}} \sim 5 \times 10^5$ раз или около -57–60 дБ. Учитывая, что $\sigma_{\text{bs}} \ll 1$ м⁻¹, суммарное ослабление сигнала в конце диапазона рабочих дальностей может достигать -70–90 дБ. Для подавления влияния ослабления эхо-сигнала в приемном тракте приемника производится коррекция и логарифмирование входного акустического сигнала – подавление в ближней зоне и усиление за время приема импульса Δt . Пусть $T_a(r)$ – априорно неизвестная передаточная функция акустического измерителя, $r = c\Delta t/2$ – расстояние от измерителя до исследуемого объема, тогда

$$\begin{aligned} Amp(r) &= T_a(r)P_{\text{rec}}(r) = \\ &= T_a(r)G_{\text{exp}}r^{-2}\exp(-2\beta r)\sigma_{\text{bs}}(r). \end{aligned} \quad (3.6)$$

Здесь $Amp(r)$ – амплитуда полезного эхо-сигнала на выходе приемного тракта ADCP без учета шумов приемника. Запишем коэффициент ослабления звука как $\beta = (\alpha + k\sigma_{\text{bs}}(r, t))$, где α – коэффициент поглощения звука в воде, зависящий от частоты, солености, температуры, но не зависящий от наличия рассеивающей взвеси, $\sigma_{\text{bs}}(r, t)$ – объемный коэффициент обратного акустического рассеяния на заданной частоте, изменяющийся по глубине и времени, k – безразмерный коэффициент, зависящий от длины волны, параметров взвеси, индикатрисы рассеяния, при этом $k\sigma_{\text{bs}}(r, t) \ll \alpha$. Сводя все константы и зависящие только от расстояния параметры в единый множитель и выделяя лишь параметры, которые имеют зависимость от времени (т.е. от внешних условий), в итоге получаем

$$Amp(r, t) = C(r)\sigma_{\text{bs}}(r, t)\exp(-2k\sigma_{\text{bs}}(r, t)r). \quad (3.7)$$

Здесь $C(r)$ – итоговая калибровочная функция, в которую входит геометрический множитель r^{-2} , множитель поглощения $\exp(-2\alpha r)$ и приборная передаточная функция $T_a(r)$ – считаем ее зависящей только от расстояния, но не зависящей от времени t на длинных интервалах (часы, дни и т.д.).

В случае слабого объемного рассеяния (3.7) можно записать как

$$Amp(r, t) = C(r)\sigma_{bs}(r, t)(1 - 2k\sigma_{bs}(r, t)r), \quad (3.8)$$

где k – постоянный малый коэффициент, определяемый эмпирически. Для случаев, когда $k\sigma_{bs}(r, t)r \ll 1$ (рассеяние в водной среде мало), заменяя дальность на глубину $h = r\cos(\theta)$, получаем наиболее простую формулу

$$Amp(h, t) = C(h)\sigma_{bs}(h, t), \quad (3.9)$$

или

$$\sigma_{bs}(h, t) = Amp(h, t)/C(h), \quad (3.9')$$

где $\sigma_{bs}(h, t)$ – объемный коэффициент обратного акустического рассеяния, $Amp(h, t)$ – амплитуда полезного эхо-сигнала на выходе акустического приемника, $C(h)$ – дальностно-приборная передаточная функция, в которую включены все параметры, зависящие от условий эксперимента и характеристик используемого прибора, но не зависящие от времени и концентрации взвешенного вещества. Здесь $h = r\cos(\theta) \sim 0...25$ м, $r = c\Delta t/2$, $c \sim 1500$ м/с, $\theta = 25^\circ$, $\Delta t \sim 0...36$ мс – интервал времени между моментами излучения и приема сигнала в диапазоне рабочих дальностей AWAC, t – долговременный параметр изменчивости коэффициента рассеяния по времени (часы, дни и т.д.).

Выражение (3.9) является упрощенной мультипликативной зависимостью уровня принимаемого сигнала от коэффициента объемного рассеяния. Для выходного сигнала донного ADCP существуют длинные документированные ряды записей, $C(h)$ и $\sigma_{bs}(h, t)$ – неизвестные функции. Аналогичный результат можно было получить с использованием уравнений гидролокации в логарифмической форме, однако альтернативный подход представляется несколько более “прозрачным”, что должно способствовать минимизации возможных ошибок. Формулы (3.9) и (2.6) почти эквивалентны друг другу. Главное отличие состоит в том, что в (2.6) параметры дальностного ослабления сигнала записаны в явном виде, а передаточная характеристика приемного тракта считается жестко логарифмической, в то время как в (3.9) передаточная характеристика приемника может быть достаточно произвольной.

В случае работы ADCP на предельных дальностях (согласно спецификации [9], $r_{\max} = 30$ м для AWAC 1 МГц) возникает необходимость учета шумов приемного тракта. Тогда вместо (3.9) можно приближенно записать:

$$\langle Amp(h, t) \rangle = C(h)\sigma_{bs}(h, t) + A_N N^{-0.5}, \quad (3.10)$$

где A_N – амплитуда собственных шумов на выходе приемника, $N = 5...7$ – число единичных измерений в каждой пачке импульсов, $\langle Amp(h, t) \rangle$ – зна-

чение выходного сигнала, осредненного по пачке импульсов. Соответственно получим

$$\sigma_{bs}(h, t) = (\langle Amp(h, t) \rangle - A_N N^{-0.5})/C(h). \quad (3.10')$$

Формулы (3.10) актуальны при максимальных рабочих дальностях $h \sim h_{\max}$, а также являются весьма приближенными, т.к. вопросы приема сигналов при малых отношениях сигнал/шум требуют специального рассмотрения. В частности, влияющими факторами являются длительность излучаемых импульсов, шаг стробирования по дальности, детали приборной обработки сигнала и т.д. В конце рабочего диапазона дальностей ($r \sim 30$ м) увеличение расстояния на $\Delta r \sim 1$ м приводит к соответствующему ослаблению эхо-сигнала в $k \sim 1.3-1.4$ раз: $k(r + \Delta r/r) \sim \exp(-2\alpha\Delta r)(r + \Delta r/r)^{-2} \sim 1.34^{-1}$ при коэффициенте поглощения $\alpha \sim 0.5$ дБ/м. Если при этом отношение сигнал/шум $S_N \sim 1$ дБ ~ 1.25 (см. комментарий к рис. 1), то при уменьшении дистанции локации полезный сигнал пропорционально растет относительно шумов, и на дальности $r = 25$ м эхо-сигнал в 4.5 раз выше, т.е. $S_N \sim 5.6$ при прочих равных условиях, что обеспечивает устойчивую работу без необходимости поправок на шумы. Поэтому есть основания для использования выражений (3.7–3.9) практически во всем диапазоне рабочих дальностей AWAC, м.б. за исключением предельных дальностей.

2.4. Гипотеза о возможности калибровки приемного тракта ADCP по длинным массивам записей сигналов обратного акустического рассеяния заключается в принятии следующих предположений:

а) постоянство передаточной функции $C(h)$ из (3.9) по времени, в т.ч. в различных сериях долговременных измерений;

б) существование в массивах записей сигналов $Amp(h, t)$ ситуаций “чистой воды” – когда акустическая мутность является минимальной, а коэффициент объемного рассеяния мал: $k\sigma_{bs}(h, t)h \ll 1$ и практически не зависит от глубины: $\sigma_{bs}(h, t) \sim \sigma_0(t)$. В этом случае для вычисления калибровочно-передаточной функции $C(h)$ можно использовать выражение (3.9). Точность эмпирической калибровки тракта ADCP, соответственно, зависит от корректности этих предположений.

Понятие “чистой воды” также является условным, т.к. именно наличием взвеси обусловлено получение сигналов обратного акустического рассеяния. Более важным является постоянство коэффициента обратного рассеяния по глубине, что также наиболее вероятно в случаях максимально прозрачных вод.

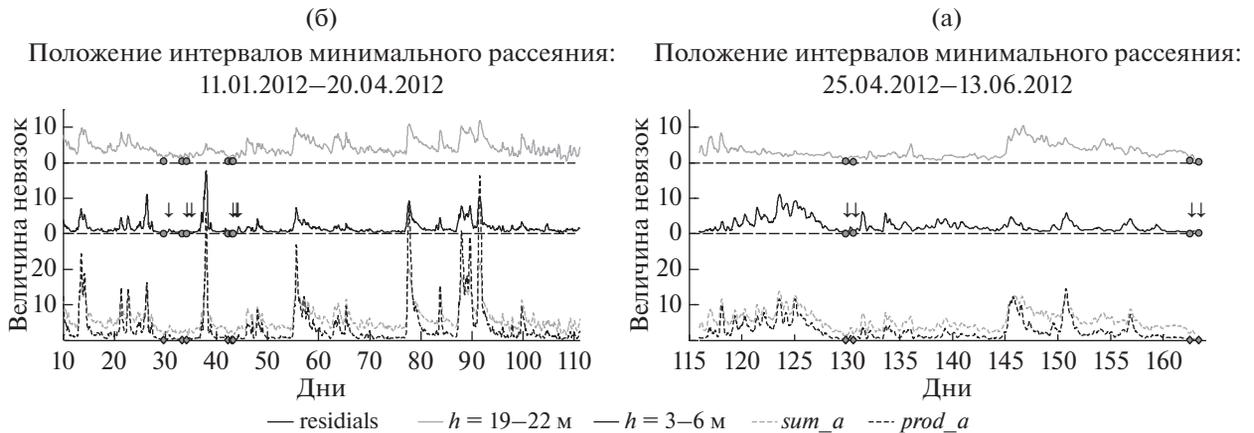


Рис. 2. Примеры построения нормализованных рядов “невязок” $res_{1,2} = y - \min(y)$ в слоях 3–6 м и 19–22 м (верхний и средний графики), а также ряды параметров $sum_a = res_1 + res_2$ и $prod_a = res_1 res_2$ (нижний график) в зимнюю (а) и весеннюю (б) серии измерений 2012 г. Жирными точками отмечено положение выделенных микромассивов “прозрачных вод”, по горизонтали – дни года с 01.01.2012 г.

3. МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ ПРИЕМНОГО ТРАКТА ADCP ПО СИГНАЛУ ОБРАТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ

В связи со значительным объемом исходных данных была разработана последовательность автоматизированных процедур поиска ситуаций максимальной акустической прозрачности воды с целью восстановления приборной передаточной функции с использованием (3.9). Методика состояла в поэтапном редуцировании размеров исходных массивов при сохранении фрагментов с минимальными значениями обратного рассеяния. На последних этапах проводилась визуальная оценка нескольких выделенных профилей с минимальным уровнем сигнала, выделение наиболее достоверных профилей и их полиномиальная аппроксимация.

Последовательность процедур обработки сигнала:

а) в одном из каналов сигнала обратного рассеяния выделялись фрагменты профилей в приповерхностном (горизонты 3–6 м) и придонном (19–22 м) слоях, сигналы интегрировались по вертикали, в результате чего были получены временные ряды уровней сигнала $x_1(i)$ и $x_2(i)$ для каждой “длинной” серии измерений (примеры на рис. 1в, 1г), далее обработка проводилась отдельно для каждой отдельной серии измерений;

б) временные ряды $x_{1,2}(i)$ приводились к нормализованному виду с помощью стандартной нормировки $y(i) = (x(i) - \langle x \rangle) / std(x)$, вычислялись их минимальные значения $\min(y)$ и значения “невязок” (residual): $res_{1,2}(i) = y(i) - \min(y)$, которые заведомо положительны по модулю; здесь $\langle x \rangle$, $std(x)$ – средний уровень сигнала и стандартное отклонение, рассчитанные по конкретной серии измерений;

в) в качестве критерия для выделения наиболее прозрачных вод формировались 2 эмпирических параметра – сумма и произведение: $sum_a(i) = res_1(i) + res_2(i)$, $prod_a(i) = res_1(i)res_2(i)$, для которых производился поиск минимальных значений в каждой серии измерений (рис. 2);

г) значения $sum_a(i)$, $prod_a(i)$ сравнивались с пороговыми числами H_s , H_p , выбираемыми эмпирически. Результаты положения их минимумов оказались близкими друг к другу (корреляция $R \sim 0.94-0.96$), однако критерий сравнения $\{prod_a(i) < H_p\}$ оказался более чувствительным и использовался как основной;

д) выделенные массивы точек $ii(j) \Leftrightarrow \{prod_a(i) < H_p = 0.25\}$ подвергались дальнейшей фильтрации – отбрасывались уединенные точки, вычислялись длины полученных непрерывных микросерий $ii(j)$, сохранялись только те серии, длина которых превышала заданный порог;

е) начальная пороговая продолжительность микросерии задавалась равной 6 часам непрерывных измерений. Если таких микросерий не обнаруживалось или их было меньше 2-х, то порог последовательно сокращался до получения хотя бы 2-х микросерий “чистой воды” для каждой “длинной” серии; индексы микросерий фиксировались, для каждой сохраненной микросерии вычислялся единый средний вертикальный профиль уровня обратного сигнала;

ж) построенные профили (около 30-ти для 3-годового ряда измерений) фиксировались, вводились на графики и анализировались визуально, выбирались наиболее достоверные (рис. 3а), для них строились полиномиальные аппроксимации (рис. 3б) для вычисления приборных передаточных функций $C(h) = const \cdot Amp(h)$ согласно (3.9), полагая $\sigma_{bs}(h) = \sigma_0 = const$. Аппроксимации $C(h)$

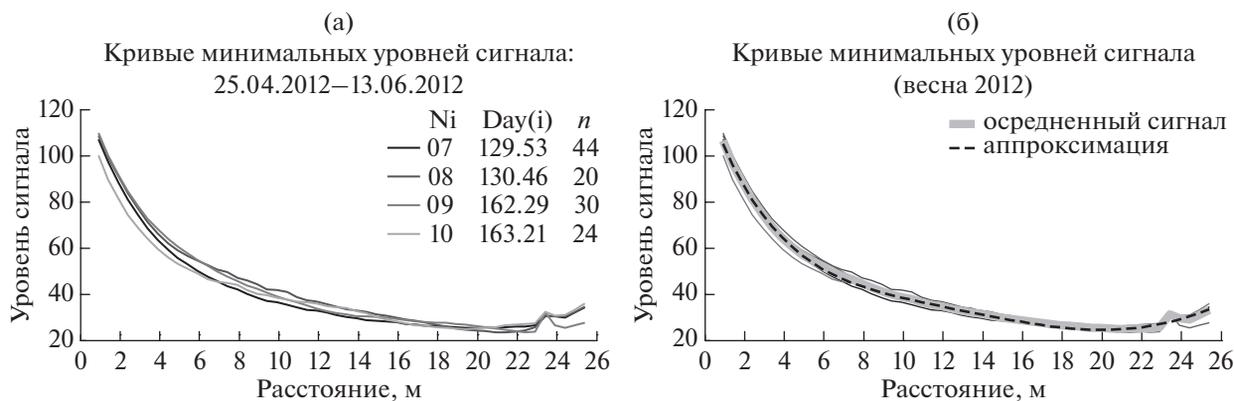


Рис. 3. Профили сигналов обратного рассеяния наиболее “чистых вод” в выделенных микросериях в весенней серии данных 2012 г. (а), приведены номера, положение начальных отсчетов (от 01.01.2012) и их количество в каждой микросерии. Те же профили с наложенным средним сигналом по той же серии измерений и его полиномиальная аппроксимация (б). По горизонтали – расстояние от гидроакустического сенсора по глубине (м), по вертикали – отсчеты (counts) в выходных единицах AWAC.

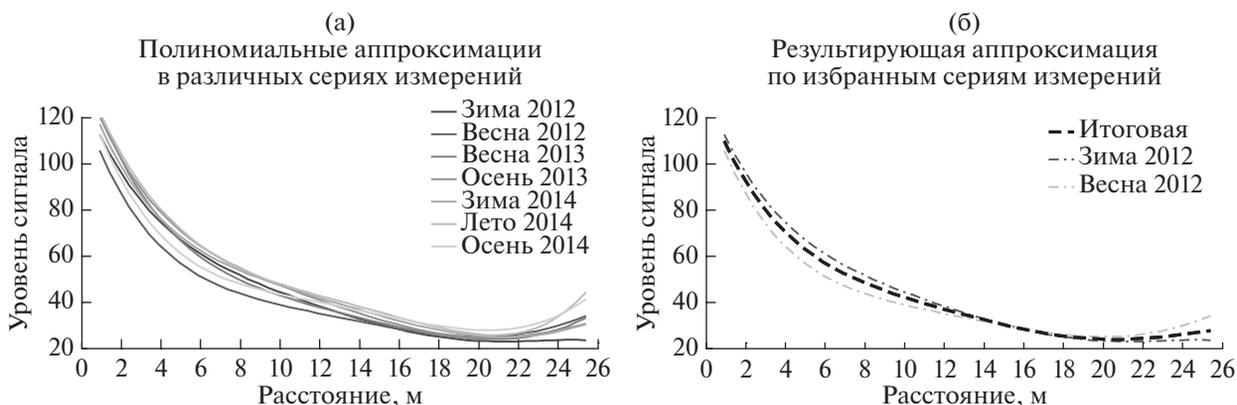


Рис. 4. Ряд полиномиальных аппроксимаций приборных передаточных функций в разных сериях измерений (а). То же по избранным сериям измерений в зимний и весенний сезоны 2012 г. с результирующей аппроксимацией передаточной функции (б). Градуировка осей соответствует рис. 3, в легенде перечислены серии измерений.

для каждой серии измерений сохранялись в отдельных файлах.

Исходно предполагалось построить единую приборную передаточную функцию $C(h)$. Оказалось, для разных “длинных” серий измерений функции $C(h, j)$ (j – номер серии) несколько отличаются друг от друга (рис. 4а). Судя по аппроксимациям профилей обратного акустического рассеяния для наиболее “чистых вод” в разных сериях измерений – полученные кривые примерно соответствуют друг другу по форме, но несколько сдвинуты по вертикальной оси. В теплый сезон (лето–осень) кривые $C(h, j)$ лежат выше, чем в холодный (зима–весна), что соответствует более высокому содержанию взвешенного вещества, в т.ч., биологического происхождения. Наблюдаемые отличия передаточных функций не являются значительными и мало влияют на итоговые результаты. Коэффициент корреляции между аппроксимациями $C(h, j)$ составляет $R \sim 0.98–0.99$, а абсолютные отличия не превышают 5–6 единиц входного сигнала.

Для практического использования была выбрана передаточная функция, построенная как полиномиальная аппроксимация 5-й степени из 2-х серий измерений – зимней и весенней 2012 г. (рис. 4б), т.к. они наиболее полно соответствуют условиям “чистой воды”. Параметры аппроксимации составили:

$$C(h) = \sum P_i h^i, \quad i = 0 \dots 5,$$

$$P_0 = 119.6, \quad P_1 = -10.29,$$

$$P_2 = 0.6105, \quad P_3 = -2.063 \times 10^{-2},$$

$$P_4 = 3.439 \times 10^{-4}, \quad P_5 = -2.157 \times 10^{-6}.$$
(3.11)

4. ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ АМПЛИТУДНОЙ КАЛИБРОВКИ

На основе построенной аппроксимации приборной передаточной функции $C(h)$ была проведена корректировка массивов данных сигнала обратного акустического рассеяния AWAC. Примеры

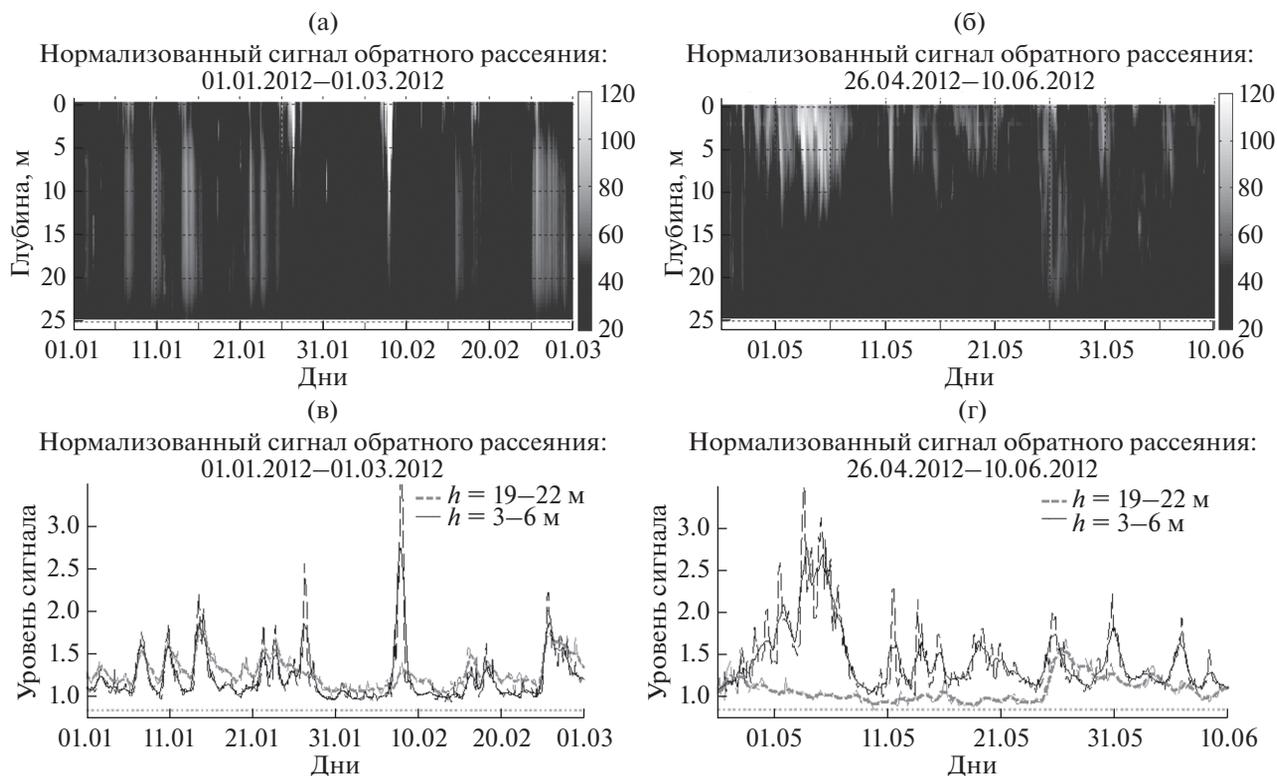


Рис. 5. Нормализованные регистрограммы (а, б) и графики значений сигнала обратного акустического рассеяния в слоях 3–6 м и 19–22 м в зимнюю (а, в) и весеннюю (б, г) серии измерений 2012 г. после амплитудной калибровки. Диапазон границ шкалы яркостей (а–б) соответствует рис. 1 (а, б). Уровни сигнала (в, г) нормированы к единице согласно (3.9') и (3.11).

отображения сигналов рассеяния с амплитудной коррекцией приведены на рис. 5 в синхронной временной шкале с рис. 1. Регистрограммы сигналов обратного рассеяния в осях “глубина–время” представлены в той же яркостной шкале, сигналу от “чистой воды” соответствует уровень 35 единиц. Нормализованные графики значений сигнала обратного акустического рассеяния на горизонтах 3...6 м и 19...22 м нормированы на сигнал от “чистой воды” согласно (3.9') и аппроксимации (3.11).

Выявляется существенная разница характеристика сигнала обратного акустического рассеяния после выполнения амплитудной калибровки. Основные отличия:

- уровень сигнала в придонных слоях после коррекции был значительно подавлен и оказался, как правило, меньше (весенняя серия 2012 г.), чем уровень сигнала из верхних слоев моря, в то же время в зимней серии измерений средне-минимальные значения акустической “мутности” в придонном слое, как правило, выше, чем в верхних слоях;

- вариации уровня акустического сигнала, рассеянного в верхних слоях моря, значительно выше, чем вариации эхо-сигнала из придонных слоев;

- наиболее мощные усиления акустической мутности наблюдаются именно в верхних слоях (7–8 февраля, 1–6 мая 2012 г.), их можно предварительно интерпретировать как результат воздействия ливневых осадков (это требует уточнений);

- достаточно часто наблюдаются относительно равномерные по глубине локальные усиления уровня акустического сигнала продолжительностью от единиц часов до 1–2 сут. Как правило, усиления сигнала являются более выраженными в верхних слоях моря, реже наблюдаются противоположные ситуации. В весенний период 2012 г. рассеивающие слои были локализованы, в основном, на глубинах до 10 м, что может объясняться скоплением фитопланктона выше области нарастающего термоклина.

Последние отмеченные особенности работают в пользу гипотезы о биологическом происхождении взвесей, ответственных за квазиоднородные по глубине изменения уровня акустического сигнала, поскольку именно органическая взвесь находится в уравновешенном плотностном состоянии с морской водой и может длительное время переноситься течением, совершая некоторые вертикальные колебания, ограниченные положением слоя скачка плотности в термоклине.

Более подробный анализ временной изменчивости уровня сигнала обратного акустического рассеяния и вызывающих его причин выходит за пределы данной работы и должен быть предметом дальнейших исследований.

Предполагается, что полученные согласно описанной методике относительные единицы акустического рассеяния (рис. 5в, 5г) жестко связаны с объемным коэффициентом обратного акустического рассеяния для конкретных параметров эксперимента (частоты акустического сигнала, параметров взвеси, температуры, солёности) и, в рамках этих условий, являются объективной мерой содержания взвеси в единице объема морской воды. В дальнейшем планируется проведение лабораторных и натурных целевых экспериментов по измерению объемной концентрации взвеси в количественных единицах объемного содержания взвеси, а также для оценок размерного состава взвешенного вещества в пробах, отобранных с различных горизонтов.

5. ВЫВОДЫ

В работе предложен эмпирически обоснованный метод сквозной калибровки сигнала обратного рассеяния акустического доплеровского профилографа течений по длинным рядам экспериментальных данных, включая компенсацию факторов дальностного ослабления сигнала и, предположительно, недостаточно хорошо известной передаточной характеристики приемного тракта акустического приемника. Последнее допущение отличает предложенную методику от ранее опубликованных и может служить предметом обсуждений.

Полученные выше результаты основаны на двух основных допущениях: а) правомерность использования упрощенной мультипликативной зависимости (3.9) в ситуациях “чистой воды”; б) постоянство коэффициента объемного акустического рассеяния морской воды по вертикали в области ближнего шельфа в тех же случаях. Практический опыт работы с данными ADCP на ЧЭПП позволяет считать, что принятие этих допущений на практике оправдано. В работе были приняты специальные меры по повышению достоверности выбора ситуаций “чистой воды” и однородности содержания взвеси по вертикали. Интервалы времени максимальной акустической прозрачности имели длительность не менее 4–6 часов, внутри которых данные усреднялись. Менее стабильные профили сигналов были исключены из калибровки.

Основным критерием корректности разработанной здесь процедуры приборно-независимой калибровки являются ее результаты, которые, однако, не являются самоцелью. Амплитудная ка-

либровка сигнала обратного акустического рассеяния может быть использована при последующих исследованиях характеристик и изменчивости содержания взвеси путем сопоставления записей уровня акустического эхо-сигнала после их амплитудной коррекции с результатами независимого анализа содержания взвешенного вещества *in situ* и в лабораторных условиях

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-05-00159 и РНФ (проект № 14-17-00382).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др.* Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 16–29.
2. *Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О. и др.* Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // Океанология. 2012. Т. 52. № 5. С. 629–642.
3. *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.
4. *Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьёв В.А. и др.* Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
5. *Пиотух В.Б., Баранов В.И., Куклев С.Б. и др.* Результаты тестового эксперимента по сопоставлению данных измерений трех близкорасположенных донных станций ADCP // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 1–14.
6. *Урик Роберт Дж.* Основы гидроакустики. Л., Судостроение, 1978. 448 с. (*Robert J. Urick. Principles of underwater sound. 3-d Edition. McGraw Hill Book Company, 1983, P. 417*).
7. *Фирсов Ю.Г.* Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров. СПб.: Нестор-История, 2010. 348 с.
8. *Шулейкин В.В.* Физика моря, 4-е изд. М.: Наука, 1968. 1090 с. Гл.7, С. 799–800. (*Shuleykin V. V. Fizika Morya (Sea Physics). Moscow: Nauka, 1968. 1090 p.*)
9. AWAC Acoustic Wave And Current Profiler // [электронный ресурс]: <http://www.nortek-as.com/lib/brochures/datasheet-awac>.
10. *Baranya S., Józsa J.* Estimation of suspended sediment concentrations with ADCP in Danube River // J. Hydrol. Hydromech. 2013. V. 61. № 3. P. 232–240.
11. *Deines K.L.* Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers // Proceedings of IEEE 6-th Working Conference on Current Measurements, San Diego, CA, March 11–13, 1999. P. 249–253.
12. *Gartner J.W.* Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic

- Doppler current profiler in San Francisco Bay // California. Marine Geology. 2004. V. 211. P. 169–187.
13. *Kim Y.H., Voulgaris G.* Estimation of suspended sediment concentration in estuarine environments using acoustic backscatters from an ADCP // Proceedings of the International Conference on Coastal Sediments (Clearwater Beach, Florida, USA), 2003. 10 p.
 14. *Lohrmann A.* Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments. // Nortek Technical Note No: 003, 2001, October 15. 5 p. <http://www.nortek-as.com/lib/technical-notes/seditments>.
 15. Two-way Radar Equation (Monostatic) // <http://www.tscm.com/2waymon.pdf> // Navy Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook, 1 April 1997 NA WCWPNS TP 8347 w / Rev 2, 1999, Ch. 4.4.
 16. *Wall G.R., Nystrom E.A., Litten S.* Use of an ADCP to compute suspended-sediment discharge in the tidal Hudson River, New York // U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5055. 2006. 16 p.

Acoustic Backscatter Amplitude Calibration for the Bottom Mounted ADCP on the base of Long-Term Data Set

V. B. Piotukh, A. G. Zatsepin, S. B. Kuklev

The possible approach and preliminary results of the acoustic backscatter signal amplitude calibration of the ADCP mounted on the seabed of the Black Sea shelf is considered. The object is to obtain the unbiased vertical profiles of acoustic signal level, depending of the real volume acoustic properties of sea water in units of relative acoustic turbidity in concrete frequency range. The proposal about existence of intervals of hydrologic quietness and acoustic clarity is used. Both the acoustic turbidity is minimal and the suspended matter vertical profiles are mostly uniform in long seria of measurements. In the frame of this hypothesis the intervals of the least acoustic turbidity were marked out and the transfer function of the input section of ADCP calibration were made. The corrected profiles of acoustic backscatter signal levels arrays relatively level of conventionally 'clear water' are obtained. Some new features of acoustic backscatter vertical profiles were revealed due to the amplitude calibration. Results are intended for the analysis of vertical and time variability of the suspended sediment concentration in nearby shelf water of the Black Sea.