

Анализ изменчивости сигнала обратного акустического рассеяния по данным ADCP и спутниковых наблюдений в северо-восточной части Чёрного моря

В. Б. Пиотух¹, С. А. Мысленков^{1,2}, А. Г. Зацепин¹,
А. Г. Александрова¹, Д. М. Соловьев^{1,3}

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: zatsep@ocean.ru

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова*
Москва, 119991, Россия
E-mail: stasocean@gmail.com

³ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия*
E-mail: solmit@gmail.com

В статье приводится анализ изменчивости интенсивности сигнала обратного акустического рассеяния на донной станции ADCP, установленной в 2011–2012 гг. на гидрофизическом полигоне ИО РАН. Данные ADCP прошли амплитудную калибровку, позволяющую минимизировать факторы изменения расстояния до датчика и ослабления сигнала морской водой. Всего за исследуемый период было выделено 37 событий резкого увеличения интенсивности эхо-сигнала. В качестве основных факторов, влияющих на интенсивность эхо-сигнала, рассматривались: ветровое волнение, осадки, речной сток, пузырьки воздуха и цветение фитопланктона. Проведено сопоставление параметров ветровых волн, рассчитанных при помощи волновой модели SWAN, с изменением интенсивности эхо-сигнала. Выявлено, что при высоте значительных волн более 1 м, как правило, наблюдается увеличение интенсивности эхо-сигнала, что связано с взмучиванием донных отложений при обрушении волн на мелководье. Обнаружено, что в районе исследований в 60 % случаев увеличение интенсивности рассеяния связано с ветровым волнением. Часть локальных максимумов эхо-сигнала в верхнем слое вод связана с присутствием пузырьков воздуха при воздействии сильного ветра (новороссийской бory или сильных штормов с южных румбов). Наиболее продолжительный период увеличения интенсивности эхо-сигнала связан с цветением кокколитофорид. Остальные случаи связаны со стоком рек и осадками.

Ключевые слова: обратное акустическое рассеяние, эхо-сигнал, ADCP, Чёрное море, ветровое волнение

Одобрена к печати: 19.11.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-141-152

Введение

Одним из параметров, измеряемых доплеровским акустическим профилографом (ADCP), является величина интенсивности обратного акустического рассеяния (далее — интенсивность эхо-сигнала). Акустический сигнал, излучаемый ADCP, рассеивается взвешенным веществом и регистрируется прибором как эхо-сигнал. Интенсивность эхо-сигнала является функцией от следующих параметров: расстояние от рассеивателя до прибора, ослабление сигнала морской водой и общая концентрация взвешенных частиц (Lohmann, 2001). Интенсивность эхо-сигнала во многом определяется присутствием в воде следующих объектов и свойств: планктон, минеральное взвешенное вещество, пузырьки воздуха и неоднородности плотности (Jourdin et al., 2014). В зависимости от частоты, на которой работает ADCP, основной вклад в рассеяние звука будут вносить частицы, обладающие различным размером (Gruber et al., 2016). Существует ряд работ, где на основе данных ADCP определяется общая концентрация взвеси (Сушинов, Черчаго, 2009). Но из-за одновременного влияния различных факторов на интенсивность обратного рассеяния часто возникают сложности в интерпретации полученных результатов.

Для анализа концентрации взвеси и хлорофилла применяются данные дистанционного зондирования (Li et al., 2003; Zhang et al., 2010). Но, как и в случае с использованием ADCP, возникают сложности в определении генезиса наблюдаемых явлений. Спутниковые оптические измерения позволяют определять спектральные свойства излучения, исходящего из-под поверхности воды. Зная спектральный состав взвешенного вещества, можно по спутниковым измерениям оценить относительные вклады от излучения водной поверхностью и рассеяния на взвешенных частицах и тем самым определить концентрацию взвеси на поверхности. Сигнал, регистрируемый датчиками в оптическом диапазоне, определяется рассеянием на гидрозоле (фитопланктоне и взвешенных минеральных частицах), а также отражённым от поверхности солнечным излучением (наиболее сильно проявляющимся в зоне солнечного блика). Гидрозоли можно рассматривать как пассивные трассеры поверхностных течений, и формируемые ими фронтальные зоны, как правило, соответствуют линиям тока. Таким образом, анализ спутниковых снимков позволяет выделять районы с повышенной концентрацией взвешенного вещества, области интенсивного цветения, а также определённые структуры в поле течений.

Однако спектральный состав взвеси может значительно отличаться для различных регионов Мирового океана, при этом особенно сложной задачей является восстановление концентрации взвеси в наиболее мутных водах, например в прибрежных и приустьевых районах моря (Кременчуцкий и др., 2014; Li et al., 2003). В таких районах концентрация взвешенного вещества может увеличиваться на порядки по сравнению с глубоководной частью, а спектральные свойства излучения могут существенно меняться.

Существует прямой способ определения концентрации взвешенного вещества: постановка в море седиментационных ловушек (Клювиткин и др., 2016) и последующий химический и гранулометрический анализ собранного вещества. Однако он является дорогостоящим и трудоёмким. Данный метод обладает рядом особенностей: ловушки собирают вещество интегрально, со всего водного столба, расположенного над ними; период сбора вещества, как правило, достаточно продолжителен по времени и не позволяет получить реальную информацию о короткопериодной изменчивости (масштаб первых суток).

В силу перечисленных причин использование ADCP для оценки концентрации взвешенного вещества с хорошим вертикальным разрешением является перспективным методом. Важные результаты могут быть получены при комплексном подходе, основанном на использовании данных дистанционного зондирования и данных ADCP.

Ранее в Чёрном море уже проводились исследования различных процессов и явлений на основе информации об интенсивности сигнала обратного акустического рассеяния ADCP. Например, в работе (Морозов и др., 2017) приведены результаты анализа распределения и поведения звукорассеивающего зоопланктона в Чёрном море.

Существующие приборы ADCP не предназначены для использования в качестве измерителей концентрации взвеси, так как в них отсутствует привязка уровня принимаемого сигнала к единицам объёмного акустического рассеяния. Для корректного анализа содержания взвешенного вещества необходима дополнительная амплитудная калибровка приёмного тракта (см., например, работы (Морозов и др., 2017; Сухинов, Черчаго, 2009)).

В настоящей статье приводится анализ изменчивости интенсивности эхо-сигнала на донной станции ADCP, установленной в 2011–2012 гг. на гидрофизическом полигоне ИО РАН. Проведено сопоставление данных ADCP с доступными спутниковыми данными. Сделана попытка найти связь между изменением интенсивности эхо-сигнала и ветровым волнением, осадками, речным стоком и цветением кокколитофорид.

Данные и методы

В течение ряда лет в шельфовой зоне Чёрного моря на гидрофизическом полигоне (ИО РАН, г. Геленджик) применяют донные ADCP (Пиотух и др., 2016). В настоящей работе использованы данные AWAC Sensor Continental 1000 кГц фирмы Nortek (далее — AWAC) (Зацепин

и др., 2012), который был установлен на глубине 25 м вблизи г. Геленджика на траверзе м. Толстый на расстоянии 1,1 км от берега (рис. 1а). Для анализа использован ряд записей интенсивности эхо-сигнала AWAC за период с 02.11.2011 по 11.08.2012 с дискретностью от 10 до 20 мин. К данным AWAC была применена амплитудная калибровка, подробно описанная в работе (Пиотух и др., 2017). В записях интенсивности эхо-сигнала были выделены интервалы минимальных уровней, наблюдаемые при сильных апвеллингах. Эта методика позволяет минимизировать факторы изменения расстояния до датчика и ослабления сигнала морской водой. В результате был получен ряд данных с шагом 3 ч, где эхо-сигнал нормирован и значение «1» соответствует состоянию условно «чистой» воды.

Для анализа изменения интенсивности эхо-сигнала привлекались данные моделирования ветрового волнения. Для расчёта параметров ветрового волнения использовалась волновая модель SWAN на неструктурной сетке с шагом по пространству 10 км в открытом море и около 500 м в точке установки ADCP. В качестве входных данных о ветре был взят реанализ NCEP/CFSv2 (~0,2°, шаг по времени 1 ч).

Из выходных данных использованы: высота значительных волн, средний период, средняя длина волны, высота зыби с шагом 3 ч. Технология моделирования волнения изложена в работе (Мысленков, 2017). Качество моделирования волн при сравнении с инструментальными данными является высоким (СКО = 0,3 м, $R = 0,8$). Анализ распределения ошибок модели приведён в работе (Myslenkov, Chernyshova, 2016).

Привлекались данные ГМС Геленджик (<https://rp5.ru/>) о скорости и направлении ветра, атмосферных осадках, а также информация об осадках из реанализа NCEP/CFSv2.

Кроме того, использовались снимки сенсоров MERIS (спутник ENVISAT) и MODIS (спутники Terra и Aqua). Спектрорадиометр MERIS имел на борту 15 спектральных каналов видимого диапазона с разрешением до 260 м и полосой обзора порядка 1150 км. Спектрорадиометр MODIS получает данные в 36 спектральных каналах с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах. Он осуществляет постоянную съёмку поверхности Земли с периодом от 1 до 2 дней; из 36 каналов два (1-й, 2-й) имеют пространственное разрешение 250 м, пять (3–7-й) — 500 м, остальные каналы (8–36-й) обладают пространственным разрешением 1000 м. Полоса обзора сенсора MODIS составляет порядка 2330 км. Снимки MERIS взяты с портала <http://esa.int> и обработаны для получения параметров концентрации хлорофилла и взвешенного вещества в программе SNAP с использованием последней версии алгоритма C2RCC. Для улучшения визуального представления рассчитывались композиционные снимки на основе красного, голубого и зелёного каналов сенсора, подчёркивающие характерные зоны концентрации взвеси.

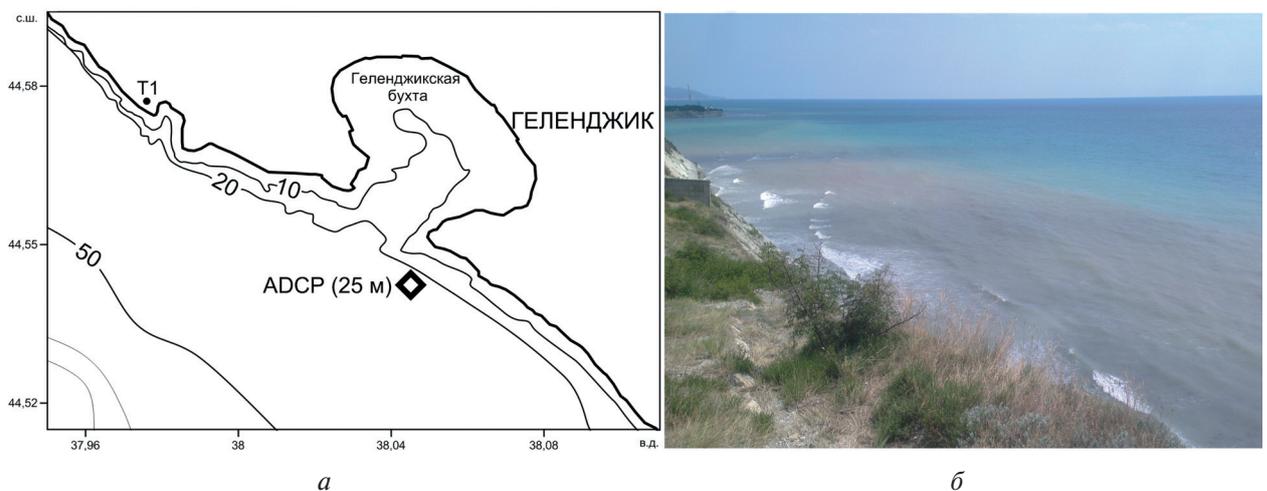


Рис. 1. Схема расположения измерителя ADCP, T1 — точка фотосъёмки, изолинии глубины (а). Фотография прибрежной зоны 30 июня 2018 г. на юго-восток из точки T1 (б)

Аналогичным образом обрабатывались снимки с сенсора MODIS для получения изображений в реальных цветах. Кроме того, использовались базовые продукты 2-го уровня (Level 2) с пространственным разрешением 1 км, которые загружались с портала OceanColor и уже имели рассчитанные значения содержания хлорофилла *a*, а также величины обратного рассеяния по данным канала 551 нм.

Результаты

На первом этапе был проанализирован весь рассматриваемый ряд данных об интенсивности эхо-сигнала. На *рис. 2* представлены осреднённые данные эхо-сигнала для верхнего (3–6 м) и нижнего (19–22 м) слоя вод. Среднее значение интенсивности эхо-сигнала за весь рассматриваемый период составляет около 1,33 в верхнем слое и 1,28 — в нижнем. Стандартное отклонение по всему ряду имеет значение 0,36 для верхнего горизонта и 0,2 — для нижнего, что говорит о более высокой изменчивости эхо-сигнала в верхнем слое вод. Среднеквадратическое отклонение для окна 1 сут составляет около 0,1. Периодически наблюдаются резкие увеличения интенсивности эхо-сигнала до 2–3 единиц. Абсолютный максимум зафиксирован 7 июля 2012 г. и составил 4,3. Далее проанализированы только 37 событий, которые хорошо выделяются визуально, а формальным критерием их выделения является СКО более 0,15. Используются нормированные значения эхо-сигнала, поэтому его увеличение, например, в два раза означает двукратное усиление интенсивности рассеяния и, вероятно, увеличение мутности. Однако в нашем случае привязка к реальным единицам мутности или концентрации взвеси отсутствует.

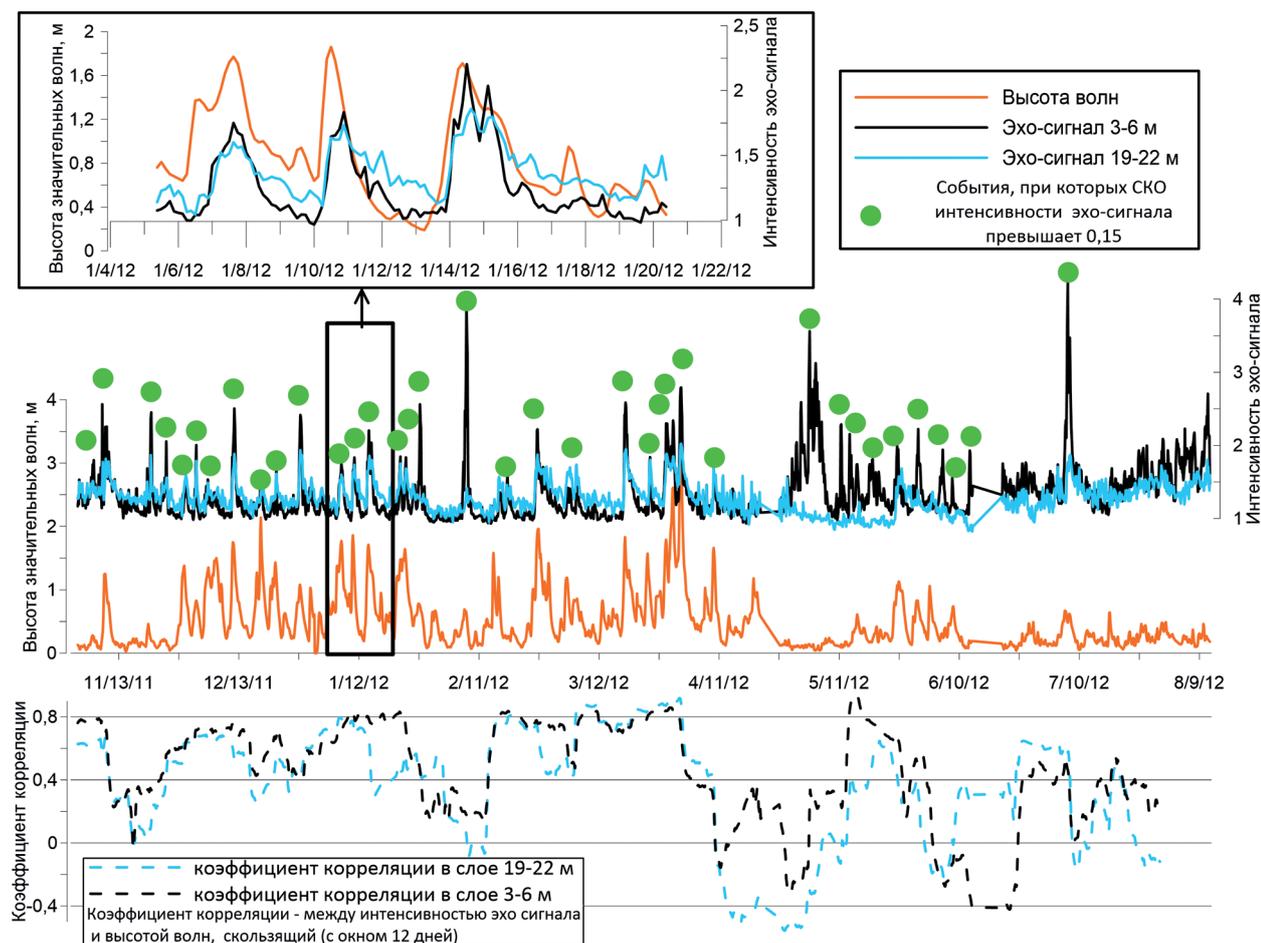


Рис. 2. Эхо-сигнал в верхнем и нижнем слое вод, высота волн, коэффициент корреляции

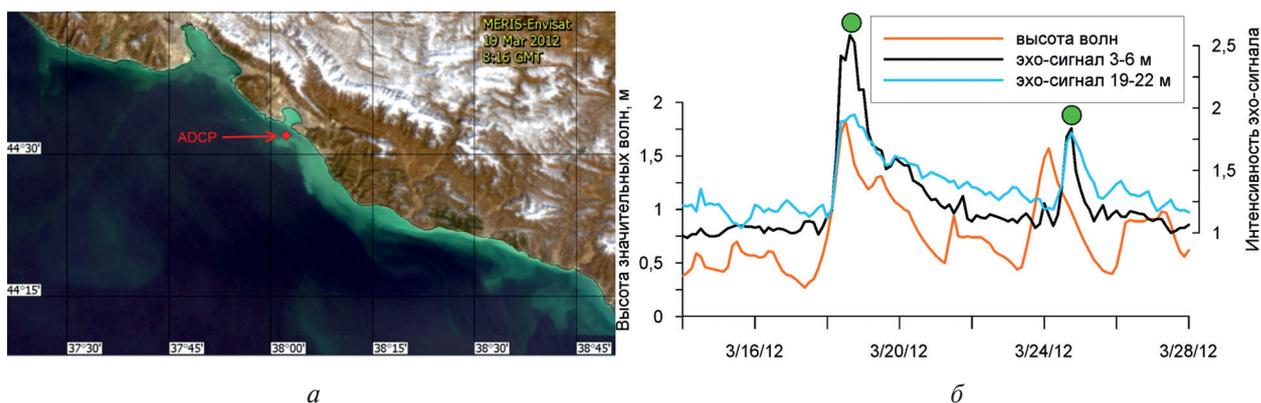


Рис. 3. Спутниковый снимок MERIS от 19 марта 2012 г. (а).
Изменение интенсивности эхо-сигнала и высота волн (б)

Рассмотрим первый механизм, вызывающий увеличение интенсивности эхо-сигнала, — это ветровые волны, которые при обрушении на мелководье вызывают взмучивание донных отложений. На рис. 2 (врезка) видно, что в январе 2012 г. три события подряд связаны с увеличением высоты волн. Коэффициент корреляции между интенсивностью эхо-сигнала и высотой волн в эти дни составляет около 0,8. Этот механизм действует следующим образом: при увеличении высоты волн более 1–1,2 м в прибрежной мелководной зоне из-за обрушения волн начинается взмучивание донных отложений, и через 3–12 ч на расстоянии 1 км от берега наблюдается увеличение интенсивности эхо-сигнала. Так как взмучивание происходит только в узкой прибрежной зоне, то время распространения вод с повышенной мутностью до точки измерений регулируется особенностями циркуляции. Течение в этом районе чаще всего направлено вдоль берега на юго-восток или на северо-запад (Зацепин и др., 2012). Отметим, что при этом механизме максимум эхо-сигнала наблюдается одновременно и на верхнем, и на нижнем горизонтах. Следовательно, вся толща вод от 3 до 25 м насыщается некоторым количеством минеральной взвеси, взмученной возле берега.

После того как высота волн начинает уменьшаться, сразу начинает падать и интенсивность эхо-сигнала. При уменьшении высоты волн до 0,5 м через 8–10 ч интенсивность эхо-сигнала в верхнем слое возвращается к исходному уровню. На нижнем горизонте уменьшение эхо-сигнала происходит всегда медленнее (возвращение к исходному уровню с задержкой относительно верхнего слоя на 12–24 ч) из-за постепенного осаждения частиц из верхнего слоя в нижний.

В качестве подтверждения приведём спутниковый снимок от 19 марта 2012 г., где вдоль берега видна полоса вод с повышенной мутностью, вызванная увеличением высоты волн 18 марта до 1,8 м (рис. 3а, б). Визуализация описываемого явления приведена на фотографии прибрежной зоны (см. рис. 1б), сделанной с высокого берега. В этот день наблюдались волны высотой около 0,9 м, преимущественно зыбь с юго-западного направления. На фотографии видно, что интенсивное взмучивание происходит в узкой прибрежной полосе до глубин 10–15 м, а при увеличении глубины цвет воды меняется от светло-коричневого к голубому.

Так как увеличение высоты ветровых волн, как правило, наблюдается на достаточно протяжённом участке побережья (сотни километров) (см. рис. 3а), то независимо от направления вдольберегового течения воды с повышенной концентрацией взвешенного вещества спустя некоторое время после взмучивания оказываются на расстоянии 1 км от берега, где был установлен прибор.

Анализ показал, что 23 из 37 событий связаны с увеличением высоты волн. При расчёте коэффициента корреляции выявлено, что сдвиг данных AWAC вперёд на 9 ч относительно высоты волн увеличивает корреляцию. Следовательно, отклик эхо-сигнала запаздывает относительно изменения высоты волн, так как взмучивание происходит в мелководной зоне шириной 50–100 м (см. рис. 1а), а прибор установлен в 1100 м от берега.

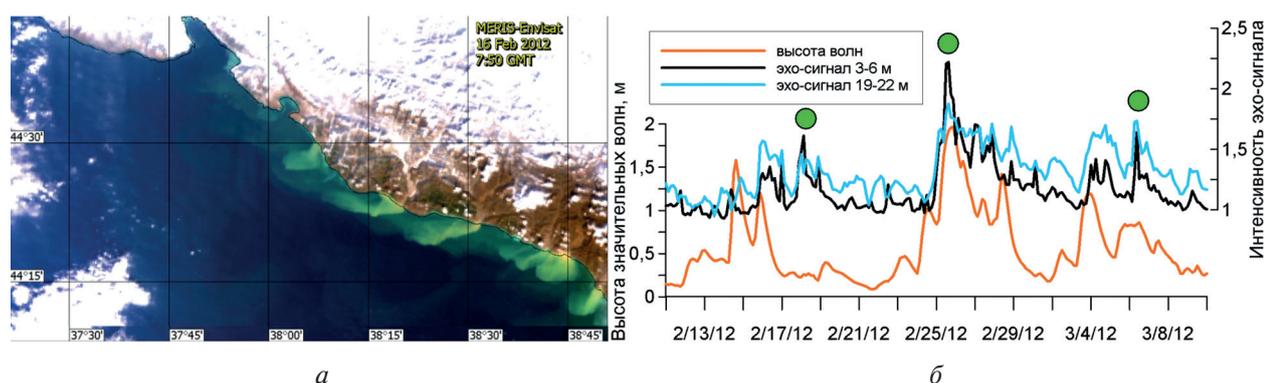


Рис. 4. Спутниковый снимок MERIS от 16 февраля 2012 г. (а). Изменение интенсивности эхо-сигнала верхнего (3–6 м) и нижнего (19–22 м) слоя вод и высота волн (б)

Наблюдаются несколько случаев увеличения высоты волн, которые не приводят к увеличению эхо-сигнала. Скорее всего, это связано с редкими ситуациями, когда ошибки моделирования приводят к завышению высоты волн (Myslenkov, Chernyshova, 2016).

Существуют случаи увеличения интенсивности эхо-сигнала, не связанные с ветровым волнением. Рассмотрим ряд событий с 12 февраля по 9 марта 2012 г. (рис. 4б). Увеличение высоты волн до 1,5 м наблюдалось 14–15 февраля, однако отклика в виде усиления интенсивности эхо-сигнала не зафиксировано. 16 февраля высота волн была меньше (1,2 м), при этом наблюдалось небольшое увеличение эхо-сигнала, не выходящее из диапазона СКО и не выделяемое как отдельное событие. Максимум эхо-сигнала 18 февраля отмечен при отсутствии значимого волнения (см. рис. 4б). На спутниковом снимке от 16 февраля виден вынос мутных вод мелкими водотоками (рис. 4а), сток которых увеличился после обильных ливней, зафиксированных на метеостанции с 14 по 16 февраля. Ливневые дожди также фиксировались и 7 марта, когда присутствовал локальный максимум эхо-сигнала, а связь с ветровым волнением прослеживается слабо. Анализ подобных событий сильно осложняется особенностями циркуляции вод в данном районе. Судя по спутниковому снимку, очаги повышенной мутности переносятся на северо-запад вдольбереговым течением. Однако вдольбереговое течение может иметь разную скорость и разное направление, поэтому «перенос» к точке установки АВАС очага мутности, вызванного стоком реки Мезыбь (с. Дивноморское), может занимать различное время, а иногда и не происходить вовсе (при течении на юго-восток). К сожалению, из-за сильной облачности данные спутников сложно использовать во время событий, связанных с осадками и увеличением стока рек. Увеличение стока и вынос в море взвешенного вещества из-за сильных атмосферных осадков является типичным явлением для малых рек северо-восточной части Чёрного моря (Завьялов и др., 2014; Osadchiev, Korshenko, 2017).

Абсолютный максимум интенсивности эхо-сигнала на верхнем горизонте ADCP зафиксирован во время катастрофического паводка в июне 2012 г. (Зацепин и др., 2013). Расход реки Ашамба увеличился до 400 м³ в сутки, а в прибрежной зоне наблюдалось сильное опреснение в верхнем слое вод (Архипкин и др., 2013). Большое количество взвешенного вещества различных фракций поступило в прибрежную зону (Крыленко и др., 2014). Резкий максимум интенсивности эхо-сигнала на верхнем горизонте составил более 4 единиц, а в нижнем слое был выражен слабо (рис. 5а, см. с. 147). Интенсивность осадков по данным реанализа представлена на рис. 5а, однако по данным метеостанции МГУ в Голубой бухте осадков было существенно больше (Архипкин и др., 2013). Во время паводка потоки мутной воды стекали в море по всему берегу в Голубой бухте. К сожалению, из-за сильной облачности хорошие спутниковые снимки, отражающие вынос взвешенного вещества в море в эти даты, отсутствуют.

Несколько максимумов эхо-сигнала связаны с ветром во время действия новороссийской боры (рис. 5б). При боре ветер дует с берега со скоростью 20–25 м/с (Тогоров et al., 2012), при этом непосредственно у берега высота волн из-за короткого разгона небольшая. Сильный ве-

тер вызывает множество обрушений, с гребней срывается пена, что хорошо видно на *рис. 6а*. Из-за большой разницы температур воздуха и воды при боре наблюдается «парение» моря, зафиксированное на спутниковом снимке (*рис. 6б*). Подобные эффекты рассматривались в работе (Гавриков, Иванов, 2015).

При увеличении скорости ветра до 15 м/с обрушений становится в 3 раза больше, а глубина проникновения пузырьков воздуха увеличивается до 10 м (Hanson, 1993).

Резкое увеличение интенсивности эхо-сигнала наблюдается только в верхнем слое, что, вероятно, связано с проникновением пузырьков воздуха на исследуемый горизонт 3–6 м и их отсутствием на глубине 19–22 м. На *рис. 5б* видны максимумы эхо-сигнала 27 января и 8 февраля. В это время ветер был северо-восточный (по данным реанализа) и его скорость составляла 18–20 м/с (по сведениям метеостанции). При южных штормах скорость ветра, как правило, не превышает 12–15 м/с и данный эффект либо не проявляется, либо суммируется с увеличением интенсивности эхо-сигнала от взмучивания. Например, 22–24 января 2012 г. скорость ветра составляла около 10 м/с, он дул с юга и небольшое повышение интенсивности эхо-сигнала наблюдалось и в верхнем, и нижнем горизонтах. Во время сильного шторма южных румбов 19 марта 2012 г. скорость ветра составляла 13 м/с, высота волн достигала 1,8 м (см. *рис. 3б*). В этом случае максимум интенсивности эхо-сигнала на верхнем горизонте, скорее всего из-за влияния пузырьков, был в 1,5 раза больше, чем на нижнем (см. *рис. 3б*).

В период с 27 апреля по 20 мая выделяется наиболее продолжительное событие повышения интенсивности эхо-сигнала, связанное с цветением кокколитофорид. Максимум наблюдался 4 мая и проявился только в верхнем слое (*рис. 7а*, см. с. 148).

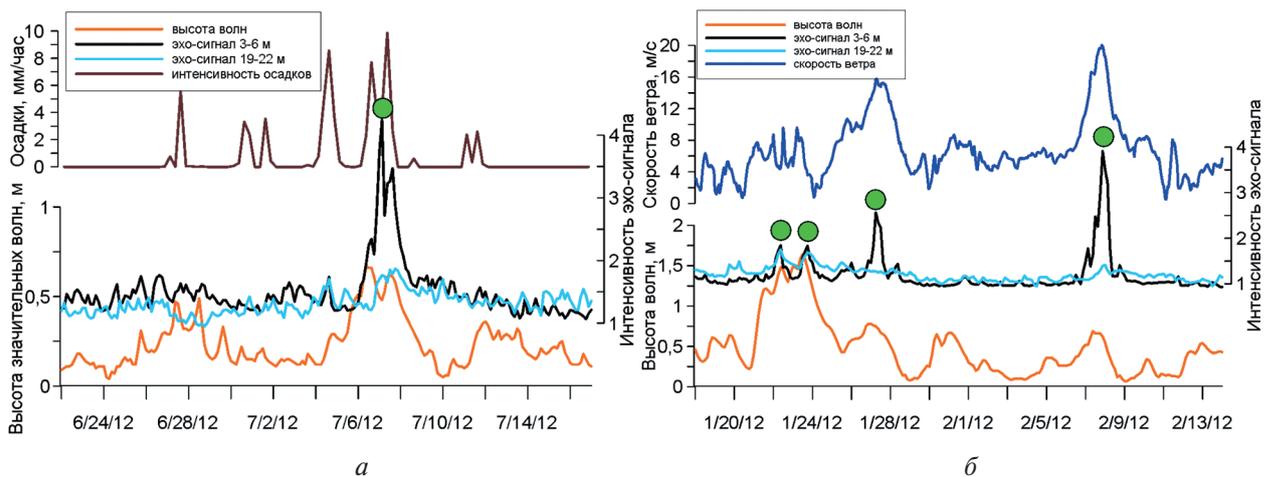


Рис. 5. Изменение интенсивности эхо-сигнала, высота волн, интенсивность осадков (*а*).
Изменение интенсивности эхо-сигнала, высота волн, скорость ветра (*б*)

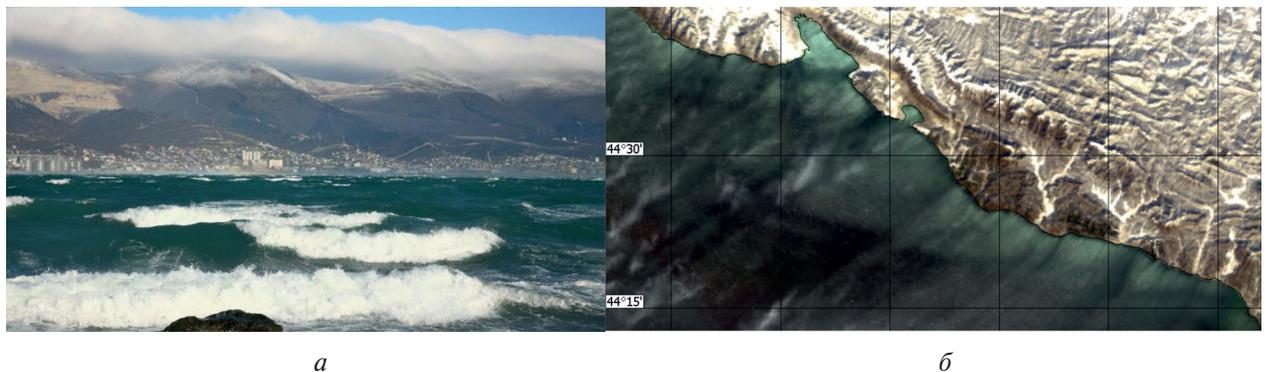


Рис. 6. Цемесская бухта во время бory (источник: <http://nvrsk-kostomarov.ru>) (*а*).
Спутниковый снимок MERIS от 7 февраля 2012 г. (*б*)

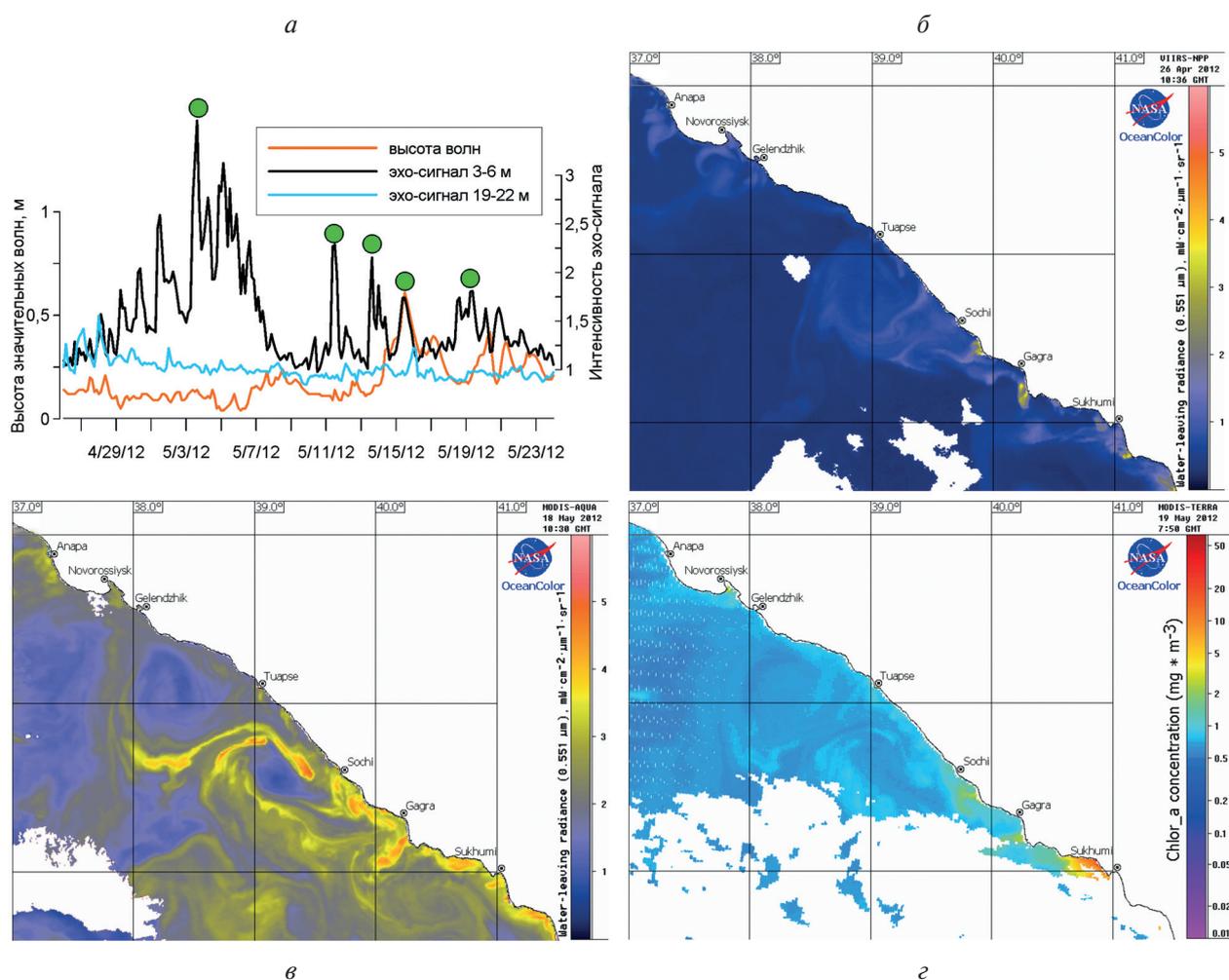


Рис. 7. Эхо-сигнал в верхнем и нижнем слое вод, высота волн (а). Обратное рассеяние по данным VIIRS-NPP (б) и MODIS-Aqua (в). Хлорофилл а по данным MODIS-Terra (з)

В качестве подтверждения генезиса данного события приведём спутниковые снимки величины обратного рассеяния от 26 апреля — до начала цветения (рис. 7б) и 18 мая — во время цветения (рис. 7в). По спутниковым данным видно, что величина обратного рассеяния увеличилась в 5–10 раз. Содержание хлорофилла по данным MODIS в этот период существенно не изменилось (рис. 7з), что указывает именно на цветение кокколитофорид.

С 12 по 20 мая наблюдалось четыре события увеличения интенсивности эхо-сигнала, при этом высота волн не превышала 0,6 м (см. рис. 7а). Эти максимумы, скорее всего, связаны с перемещением взвешенного вещества динамическими структурами, которые хорошо выражены на рис. 7в.

Слабо изученным остаётся вопрос о влиянии течений на подъём донной взвеси и связанного с этим увеличения эхо-сигнала. Проведённый в рамках данного исследования анализ не подтвердил наличие такого механизма на глубине 25 м, где был установлен прибор. Неустойчивая корреляция интенсивности сигнала и скорости течения присутствует, но это связано, видимо, с горизонтальной адвекцией более мутных вод.

Заключение

В данной работе сделана попытка определить физические причины изменчивости уровня эхо-сигнала на донной станции ADCP в прибрежной зоне Чёрного моря.

Всего за исследуемый период (02.11.2011–11.08.2012) было выделено 37 событий резко-го увеличения интенсивности эхо-сигнала. Проведено сопоставление изменений интенсивности эхо-сигнала с параметрами ветровых волн, скоростью ветра, интенсивностью осадков. Выявлено, что при высоте значительных волн более 1 м в 60 % случаев наблюдается увеличение интенсивности эхо-сигнала, что связано с взмучиванием донных отложений при обрушении волн на мелководье.

Часть локальных максимумов эхо-сигнала в верхнем слое вод связана с воздействием сильного ветра, так как из-за частых обрушений большое количество пузырьков воздуха проникает на глубину 3–6 м и регистрируется прибором.

По спутниковым изображениям поверхности моря в поле взвешенного вещества в ряде случаев удалось однозначно интерпретировать поступление взвешенного вещества со стоком рек после обильных дождей. Увеличение интенсивности эхо-сигнала из-за цветения кокколитофорид было подтверждено по спутниковым данным.

Работа авторов С. А. Мысленкова, А. Г. Александровой и Д. М. Соловьева выполнялась в рамках проекта РНФ № 14-50-00095, А. Г. Зацепина — в рамках темы госзадания № 0149-2018-0003.

Литература

1. Архипкин В. С., Добролюбов С. А., Мухаметов С. С., Недоспасов А. А., Самборский Т. В., Самсонов Т. Е., Серебренникова Е. А., Суркова Г. В. Экстремальный дождевой паводок в бассейне р. Ашамба и его влияние на рельеф дна и структуру вод моря в районе г. Геленджик // Вестник МГУ. Сер. 5: «География». 2013. № 3. С. 27–34.
2. Гавриков А. В., Иванов А. Ю. Аномально сильная бора на Черном море: наблюдение из космоса и численное моделирование // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 5. С. 615–626.
3. Завьялов П. О., Маккавеев П. Н., Коновалов Б. В., Осадчиев А. А., Хлебонашев П. В., Пелевин В. В., Грабовский А. Б., Ижицкий А. С., Гончаренко И. В., Соловьев Д. М., Полухин А. А. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293.
4. Зацепин А. Г., Пиотух В. Б., Корж А. О., Куклева О. Н., Соловьев Д. М. Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // Океанология. 2012. Т. 52. № 5. С. 629–642.
5. Зацепин А. Г., Островский А. Г., Кременецкий В. В., Пиотух В. Б., Куклев С. Б., Москаленко Л. В., Подымов О. И., Баранов В. И., Корж А. О., Станичный С. В. О природе короткопериодных колебаний основного черноморского пикноклина, субмезомасштабных вихрях и реакции морской среды на катастрофический ливень 2012 г. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. № 6. С. 717–732.
6. Ключиткин А. А., Островский А. Г., Новигатский А. Н., Лисицын А. П. Мультидисциплинарный эксперимент по изучению короткопериодной изменчивости осадочного процесса в северо-восточной части Черного моря // Докл. Академии наук. 2016. Т. 469. № 3. С. 356–360.
7. Кременчуцкий Д. А., Кубряков А. А., Завьялов П. О., Станичный С. В., Алескерова А. А. Определение концентрации взвешенного вещества в Чёрном море по данным спутника MODIS // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. № 29. С. 5–9.
8. Крыленко В. В., Косьян Р. Д., Крыленко М. В., Подымов И. С. Поступление твердого материала в прибрежную зону в районе г. Геленджика в результате экстремального ливня // Океанология. 2014. Т. 54. № 1. С. 97.
9. Морозов А. Н., Лемешко Е. М., Федоров С. В. Звукорассеивающие слои Черного моря по данным ADCP-наблюдений // Акустический журн. 2017. Т. 63. № 5. С. 513–522.
10. Мысленков С. А. О влиянии локального ветрового воздействия на высоту волн в Цемесской бухте Черного моря // Международ. научно-исследовательский журн. 2017. № 7–2(61). С. 42–47.
11. Пиотух В. Б., Баранов В. И., Куклев С. Б., Подымов О. И. Результаты тестового эксперимента по сопоставлению данных измерений трех близкорасположенных донных станций ADCP // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 1–14.

12. *Пиотух В. Б., Зацепин А. Г., Куклев С. Б.* Амплитудная калибровка сигнала обратного акустического рассеяния донного ADCP по длинным рядам измерений // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 3. С. 503–513.
13. *Сухинов А. И., Черчаго А. А.* Оценка концентрации взвешенных частиц с использованием акустического обратного рассеяния ADCP-зонда // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2009. № 8(97). С. 37–42.
14. *Gruber P., Felix D., Storti G., Lattuada M., Fleckenstein P., Deschwanden F.* Acoustic measuring techniques for suspended sediment // *IOP Conf. Series: Earth Environmental Science*. 2016. V. 49. P. 122003.
15. *Hanson J.* Winds, waves, and bubbles at the air-sea boundary // *Johns Hopkins APL Technical Digest*. 1993. V. 14. No. 3. P. 200–208.
16. *Jourdin F., Tessier C., Le Hir P., Verney R., Lunven M., Loyer S., Lusven A., Filipot J., Lepesqueur J.* Dual-frequency ADCPs measuring turbidity // *Geo-Marine Letters*. 2014. V. 34. P. 381–397.
17. *Li R. R., Kaufman Y. J., Gao B., Davis C. O.* Remote sensing of suspended sediments and shallow coastal waters // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2003. V. 41. No. 3. P. 559–566.
18. *Lohrmann A.* Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments // *Nortek Technical Note*. 2001. No. 003. 5 p. URL: <http://www.nortek-as.com/lib/technical-notes/seditments>.
19. *Myslenkov S., Chernyshova A.* Comparing wave heights simulated in the Black Sea by the SWAN model with satellite data and direct wave measurements // *Russian J. Earth Sciences*. 2016. V. 16. No. 5. P. 1–12.
20. *Osadchiev A., Korshenko E.* Small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions // *Ocean Science*. 2017. V. 13. P. 465–482.
21. *Toropov P. A., Myslenkov S. A., Shestakova A. A.* Numerical simulation of Novorossiysk bora and related wind waves using the WRF-ARW and SWAN models // *Russian J. Earth Sciences*. 2012. V. 12. No. 6. P. 1–7.
22. *Zhang M., Tang J., Dong Q., Song Q., Ding J.* Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. No. 2. P. 392–403.

Variability of the acoustic backscattering from ADCP and satellite observations in the northeastern part of the Black Sea

V. B. Piotukh¹, S. A. Myslenkov^{1,2}, A. G. Zatsepin¹,
A. G. Aleksandrova¹, D. M. Soloviev^{1,3}

¹ *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: zatsepin@ocean.ru

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mail: stasocan@gmail.com

³ *Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*
E-mail: solmit@gmail.com

The paper presents an analysis of the acoustic backscattering variability measured by the moored acoustic Doppler current profiler (ADCP). The ADCP operated at the test site of the Shirshov Institute of Oceanology RAS near Gelendzhik in 2011–2012. An amplitude calibration of the ADCP allows minimizing the errors connected with the changing sensor distance and signal attenuation by the sea water. In total, 37 events of a sharp increase of the acoustic backscattering intensity were identified. The parameters of the wind waves (calculated with the SWAN wave model) were compared with the change of the echo signal intensity. It was found that the significant wave height over 1 m led to an increase in the echo signal intensity, which is associated with the disturbance of bottom sediments due to wave breaking in shallow water. It was found that 60 % of cases of the increase in acoustic backscattering intensity were associated with wind waves. Part of the local maxima of the echo signal in the upper layer was caused by the presence of air bubbles, which were produced by a strong wind (the Novorossiysk bora or strong storms at south winds). The longest period of the increase in the echo signal intensity was associated with the blooming of coccolithophorids. There were other cases connected with river runoff and precipitation.

Keywords: acoustic backscattering, ADCP, satellite observations, Black Sea

Accepted: 19.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-141-152

References

1. Arkhipkin V. S., Dobrolyubov S. A., Mukhametov S. S., Nedospasov A. A., Samborskii T. V., Samsenov T. E., Serebrennikova E. A., Surkova G. V., Ekstremal'nyi dozhdevoi pavodok v basseine r. Ashamba i ego vliyanie na rel'ef dna i strukturu vod morya v raione g. Gelendzhik (Extreme rainfall flood in the basin of the Ashamba River and its impact of the bottom relief and sea water structure in the vicinity of the town of Gelendzhik), *Vestnik MGU, Ser. 5. "Geografiya"*, 2013, No. 3, pp. 27–34.
2. Gavrikov A. V., Ivanov A. Yu., Anomal'no sil'naya bora na Chernom more: nablyudenie iz kosmosa i chislennoe modelirovanie (Anomalously strong bora over the Black Sea: Observations from space and numerical modeling), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2015, Vol. 51, No. 5, pp. 546–556.
3. Zavyalov P. O., Makkaveev P. N., Konovalov B. V., Osadchiev A. A., Khlebopashev P. V., Pelevin V. V., Grabovskii A. B., Izhitskii A. S., Goncharenko I. V., Solovyev D. M., Polukhin A. A., Gidrofizicheskie i gidrokhimicheskie kharakteristiki morskikh akvatorii u ust'ev malykh rek rossiiskogo poberezh'ya Chernogo morya (Hydrophysical and hydrochemical characteristics of the sea areas adjacent to the estuaries of small rivers of the Russian coast of the Black Sea), *Okeanologiya*, 2014, Vol. 54, No. 3, pp. 293–308.
4. Zatsepin A. G., Piotukh V. B., Korzh A. O., Kukleva O. N., Solovyev D. M., Izmenchivost' polya techenii v pribrezhnoi zone Chernogo morya po izmereniyam donnoi stantsii ADCP (Variability of currents in the coastal zone of the Black Sea from long-term measurements with a bottom mounted ADCP), *Okeanologiya*, 2012, Vol. 52, No. 5, pp. 629–642.
5. Zatsepin A. G., Ostrovskii A. G., Kremenetskii V. V., Nizov S. C., Piotukh V. B., Solovyev V. A., Shvoev D. A., Tsibulskii A. L., Kuklev S. B., Kukleva O. N., Moskalenko L. V., Podymov O. I., Baranov V. I., Kondrashov A. A., Korzh A. O., Kubryakov A. A., Solovyev D. M., Stanichnyi S. V., Podsputnikovyi polygon dlya izucheniya gidrofizicheskikh protsessov v shel'fovo-sklonovoi zone Chernogo morya (Subsatellite polygon for studying hydrophysical processes in the Black Sea shelf-slope zone), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2013, No. 1, pp. 16–29.
6. Klyuvitkin A. A., Ostrovskii A. G., Novigatskii A. N., Lisitsyn A. P., Mul'tidistsiplinarnyi eksperiment po izucheniyu korotkoperiodnoi izmenchivosti osadochnogo protsessa v severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Multidisciplinary experiment on studying short-period variability of the sedimentary process in the northeastern part of the Black Sea), *Doklady Akademii nauk*, 2016, Vol. 469, No. 3, pp. 356–360.
7. Kremenchutskii D. A., Kubryakov A. A., Zavyalov P. O., Konovalov B. V., Stanichnyi S. V., Aleskerovala A. A., Opredelenie kontsentratsii vzveshennogo veshchestva v Chernom more po dannym sputnika MODIS (Determination of the concentration of the weighted substance in the Black Sea by the MODIS satellite data), *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2014, No. 29, pp. 5–9.
8. Krylenko V. V., Kosyan R. D., Krylenko M. V., Podymov I. C., Postuplenie tverdogo materiala v pribrezhnyuyu zonu v raione g. Gelendzhika v rezul'tate ekstremal'nogo livnya (Transport of solid material to the coastal zone near Gelendzhik after extremely heavy rains), *Okeanologiya*, 2014, Vol. 54, No. 1, pp. 97–104.
9. Morozov A. N., Lemeshko E. M., Fedorov S. V., Zvukorasseivayushchie sloi Chernogo morya po dannym ADCP-nablyudenii (Sound-scattering layers of the Black Sea based on ADCP observations), *Akusticheskii zhurnal*, 2017, Vol. 63, No. 5, pp. 553–561.
10. Myslenkov S. A., O vliyaniy lokal'nogo vetrovogo vozdeistviya na vysotu voln v Tsemesskoi bukhte Chernogo morya (On effect of local wind influence on wave height in Tsemes bay of the Black Sea), *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2017, No. 7–2(61), pp. 42–47.
11. Piotukh V. B., Baranov V. I., Kuklev S. B., Podymov O. I., Rezul'taty testovogo eksperimenta po sopostavleniyu dannykh izmerenii trekh blizkoraspolzhenykh donnykh stantsii ADCP (Results of test experiment comparing measurement data of three adjacent ADCP bottom stations), *Okeanologiya*, 2016, Vol. 56, No. 3, pp. 1–14.
12. Piotukh V. B., Zatsepin A. G., Kuklev S. B., Amplitudnaya kalibrovka signala obratnogo akusticheskogo rasseyaniya donnogo ADCP po dlinnym ryadam izmerenii (Amplitude calibration of an acoustic backscattered signal from a bottom-moored ADCP based on long-term measurement series), *Okeanologiya*, 2017, Vol. 57, No. 3, pp. 503–513.

13. Sukhinov A. I., Cherchago A. A., Otsenka kontsentratsii vzveshennykh chastits s ispol'zovaniem akusticheskogo obratnogo rasseyaniya ADCP-zonda (Estimation of weighed particles concentration using acoustic back dispersion of an ADCP-probe), *Izvestiya YuFU, Tekhnicheskie nauki*, 2009, No. 8(97), pp. 37–42.
14. Gruber P., Felix D., Storti G., Lattuada M., Fleckenstein P., Deschwanden F., Acoustic measuring techniques for suspended sediment, *IOP Conf. Series: Earth Environmental Science*, 2016, Vol. 49, p. 122003.
15. Hanson J., Winds, waves, and bubbles at the air-sea boundary, *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1993, Vol. 14, No. 3, pp. 200–208.
16. Jourdin F., Tessier C., Le Hir P., Verney R., Lunven M., Loyer S., Lusven A., Filipot J., Lepesqueur J., Dual-frequency ADCPs measuring turbidity, *Geo-Marine Letters*, 2014, Vol. 34, pp. 381–397.
17. Li R. R., Kaufman Y. J., Gao B., Davis C. O., Remote sensing of suspended sediments and shallow coastal waters, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, pp. 559–566.
18. Lohrmann A., Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments, *Nortek Technical Note*, 2001, No. 003, 5 p., URL: <http://www.nortek-as.com/lib/technical-notes/seditments>.
19. Myslenkov S., Chernyshova A., Comparing wave heights simulated in the Black Sea by the SWAN model with satellite data and direct wave measurements, *Russian J. Earth Sciences*, 2016, Vol. 16, No. 5, pp. 1–12.
20. Osadchiev A., Korshenko E., Small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions, *Ocean Science*, Vol. 13, pp. 465–482.
21. Toropov P. A., Myslenkov S. A., Shestakova A. A., Numerical simulation of Novorossiysk bora and related wind waves using the WRF-ARW and SWAN models, *Russian J. Earth Sciences*, 2012, Vol. 12, No. 6, pp. 1–7.
22. Zhang M., Tang J., Dong Q., Song Q., Ding J., Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, pp. 392–403.