

А.Н.Морозов, В.А.Иванов, С.А.Шутов, В.В.Зима,
Д.В.Дерюшкин, С.В.Федоров, А.С.Кузнецов,
Л.В.Вержевская, Е.В.Маньковская

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

АКУСТИЧЕСКИЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ ПРОФИЛОМЕТР ТЕЧЕНИЙ КАК ЭЛЕМЕНТ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ МОРЯ

Обсуждаются результаты *ADCP*-измерений скорости течений, выполненных по специальной методике в прибрежно-шельфовых водах Гераклеийского п-ова в сентябре 2016 г. Прибор использовался на ходу судна как профилометр течений и как высокочастотный эхолот. Рассмотрены методические аспекты проведения измерений. В прибрежных водах в слое глубин 15 – 25 м хорошо выражены неоднородности распределения поперечного сечения обратного рассеяния звука с характерными горизонтальными масштабами 100 – 200 м. Вдольбереговое течение проявляет относительное усиление скорости на горизонтальных масштабах 100 – 200 м в окрестности изобаты 45 м. Нормальная берегу составляющая скорости имеет слоистую вертикальную структуру. В шельфовых водах на горизонте около 40 м обнаруживается хорошо выраженный звукорассеивающий слой биологического происхождения. В верхнем 20-ти метровом слое выявлены неоднородности распределения поперечного сечения обратного рассеяния звука, которые, предположительно, имеют антропогенное происхождение.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *пространственная структура течений, поперечное сечение обратного рассеяния звука, прибрежно-шельфовые воды, ADCP, Гераклеийский п-ов*

Введение. Акустические доплеровские профилометры течений (*ADCP*) находят применение в решении широкого круга океанологических задач на протяжении нескольких десятков лет. Хорошо известно их использование в стационарном положении для изучения временной изменчивости вертикальной структуры течений [1 – 3], в частности, на подспутниковых полигонах в Черном море [4, 5]. Приборы также используются в режиме буксировки [6] и в судовом варианте [7] для исследования пространственной структуры поля скорости течений. Кроме измерения скорости течений, *ADCP* обеспечивает измерение профилей интенсивности эхосигнала, что позволяет использовать его при исследовании потоков взвешенного вещества [8, 9] и различных характеристик морской биоты [10 – 12]. Именно сочетание в одном приборе профилометра течений и эхолота, дополненное возможностью проведения измерений на ходу судна, создают благоприятные предпосылки для использования *ADCP* в решении современных океанологических, экологических и инженерных задач в прибрежно-шельфовых водах моря.

В данной статье обсуждается практический опыт использования *ADCP* серии *WHM300* производства *RDI*, приобретенный в ходе экспедиционных работ по проекту «Диагностика», в части локализации и определения харак-

© А.Н.Морозов, В.А.Иванов, С.А.Шутов, В.В.Зима, Д.В.Дерюшкин, С.В.Федоров, А.С.Кузнецов, Л.В.Вержевская, Е.В.Маньковская, 2017

терных пространственных масштабов потенциальных загрязнений в районе выпуска сточных вод очистных сооружений г.Севастополя вблизи Гераклеяского п-ова.

Приборы и данные. Экспедиция проходила 04:00 – 12:55 UTC 12 сентября 2016 г. на маломерном судне «Бирюза». При выполнении зондирования на дрейфовых станциях для измерения удельной электропроводности, температуры и глубины (CTD) использовался гидрологический автономный прибор ГАП-16, разработка сотрудников Морского гидрофизического института РАН. Комплекс гидрофизических попутных измерений (КГПИ) работал в непрерывном режиме [13]. Для измерения течений на ходу судна использовался ADCP серии WHM300 (Work Horse Monitor, рабочая частота 300 кГц) производства RDI (США) [14]. Прибор жестко крепился к левому борту судна по центру на специально изготовленной раме так, что заглубление его преобразователей составляло в среднем около 0,5 м. Схематично размещение ADCP и других элементов измерительной системы на борту судна приведено на рис.1. Детально методические вопросы проведения измерений рассмотрены в [15]. Параметры работы ADCP устанавливались следующие: дискретность по глубине 4 м, по времени 1 с, использовался широкополосный режим HR/LR, включена опция LADCP. Слой измерения составил от 7 м от поверхности моря до 10 – 15 м до дна. Обработка данных выполнялась с учетом влияния корпуса судна на показания магнитного компаса прибора и других проблемных вопросов в соответствии с [16]. Расчет параметров обратного рассеяния звука по данным интенсивности эхосигнала производился в соответствии с рекомендациями производителя [17] по уточненному соотношению, приведенному в [18]. В данной статье сила и поперечное сечение обратного рассеяния звука выражены в относительных единицах из-за отсутствия возможности выполнить калибровку.

Результаты и обсуждение. 12 сентября 2016 г. комплексные (гидрохимические, гидрологические, микроструктурные, биологические и оптические

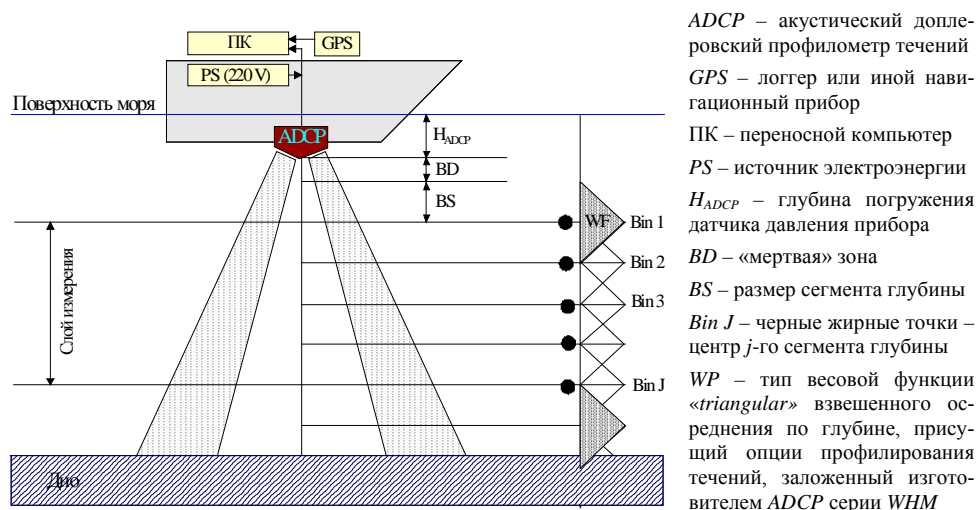


Рис. 1. Расположение элементов измерительной системы на борту маломерного судна и схематичное представление процесса профилирования течений.

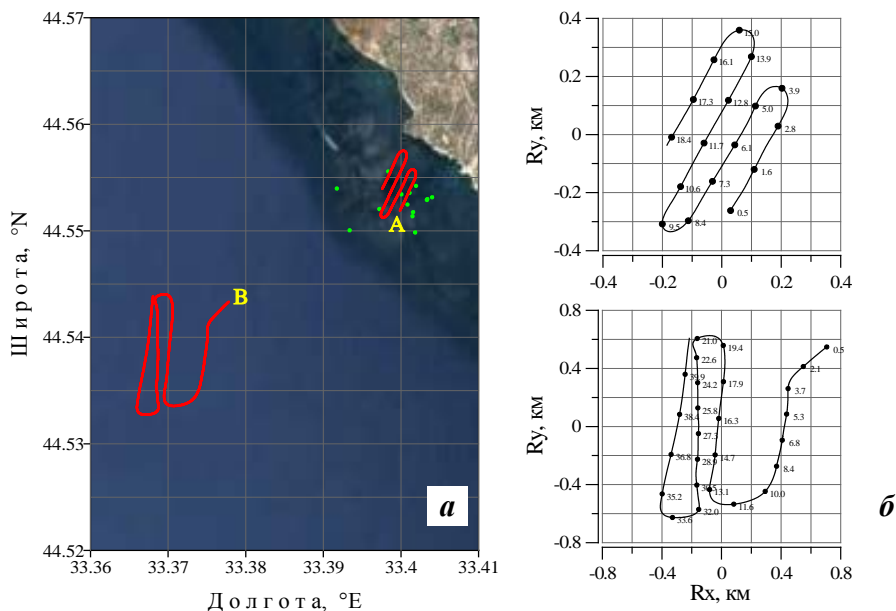
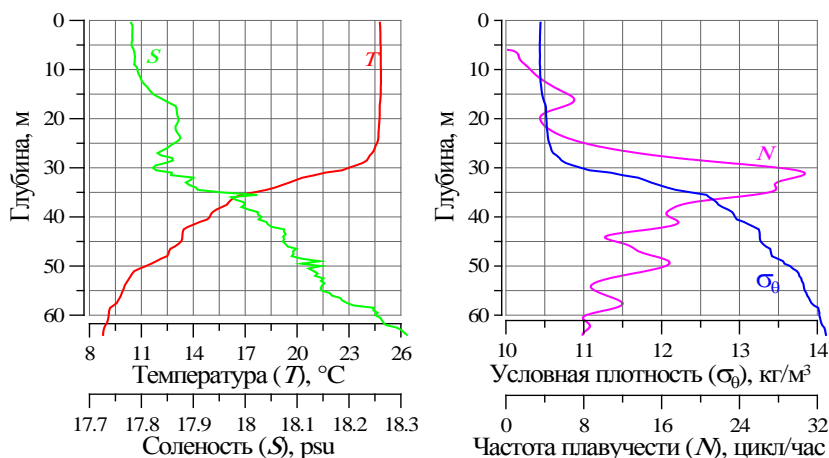


Рис. 2. Расположение микрополигонов А и В, маркеры соответствуют началу выполнения «змейки»; зеленые точки – гидрологические станции (а). Микрополигон А (вверху), микрополигон В (внизу) в линейной системе координат; черные точки – маркеры времени в минутах от начала выполнения «змейки» (б).

кие) измерения были сконцентрированы в районе предполагаемого пробоа выпускной трубы основного очистного сооружения г.Севастополя на расстоянии менее 1 км от берега [19]. Также измерения выполнялись в районе концевого диффузора выпускной трубы сточных вод на расстоянии около 3 м от берега [20] с использованием ограниченного набора инструментов КГПИ и ADCP [13]. В данной статье рассматриваются результаты ADCP-измерений, выполненных на ходу судна в режиме наиболее сложном в плане обработки данных и наиболее информативном в отношении определения размеров области потенциального антропогенного загрязнения. На рис.2 слева красными линиями представлены треки судна в прибрежной (микрополигон А) и шельфовой (микрополигон В) зонах моря. Положение маркеров соответствуют началу выполнения серии галсов в виде «змейки». Зеленые точки обозначают места проведения комплексных зондирований. Справа на рис.2, для удобства восприятия, микрополигоны приведены в локальной прямоугольной системе координат. Числовые маркеры соответствуют жирным точкам на треке судна и представляют время от начала выполнения «змейки», выраженное в минутах. Предварительно приведем фоновые характеристики распределения гидрологических параметров в районе проведения измерений.

Гидрологические параметры. На рис.3 приведены профили температуры (T , °C), солености (S , psu), условной плотности (σ_θ , кг/м³) и частоты плавучести (N , цикл/час) на самой удаленной от берега станции. В верхнем 5-метровом слое наблюдается ослабление плотностной стратификации. На горизонте 15 м отмечается локальный пикноклин с частотой плавучести



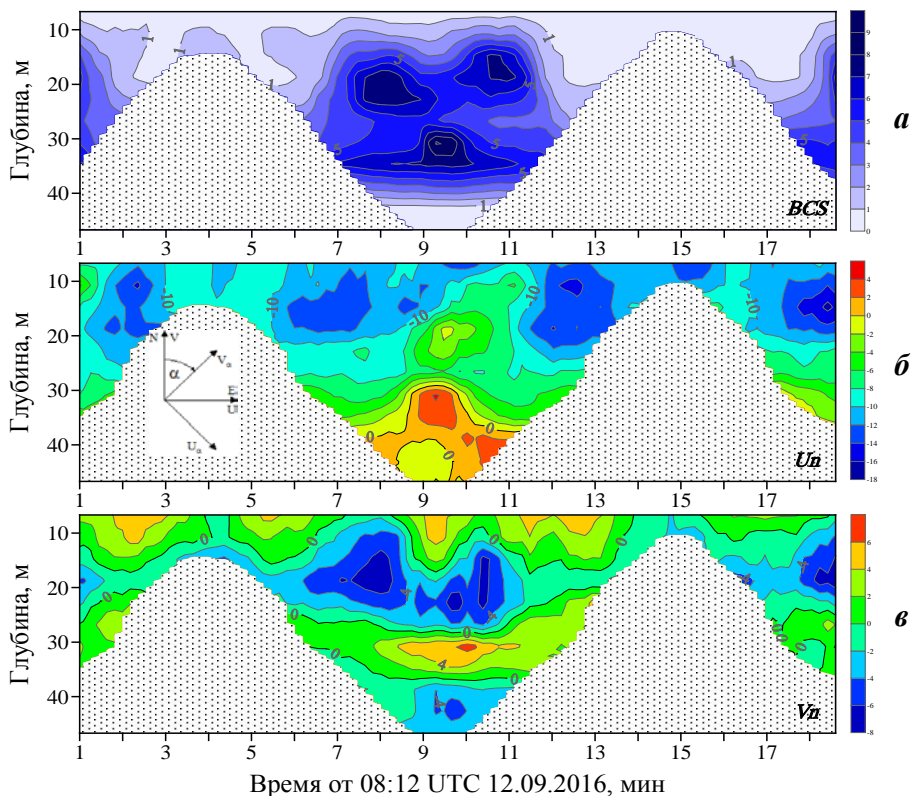
Р и с . 3. Типовые профили температуры, солёности, условной плотности и частоты плавучести в районе проведения измерений.

около 7 цикл/ч. Сезонный термоклин/пикноклин залегает на глубине около 30 м и характеризуется значением частоты плавучести около 30 цикл/ч. В слоях ниже 40 м наблюдается немонотонное убывание частоты плавучести с глубиной. Хорошо выражены ее вариации (размах около 5 цикл/ч) с характерным вертикальным масштабом около 10 м, которые могут быть вызваны прохождением или генерацией внутренних волн. Относительное уменьшение солёности в слое 25 – 35 м объясняется динамическими погрешностями измерений, зависящими от условий проведения зондирований и различием передаточных функций датчиков удельной электропроводимости и температуры ГАП-16 [21].

Микрополигон А. Начало измерений – 08:12 UTC 12 сентября 2016 г., конец – 08:31 UTC 12 сентября 2016 г. Расстояние между галсами около 100 м, протяженность в направлении 30° от севера по часовой стрелке около 800 м. Средняя скорость движения судна около 2,2 м/с.

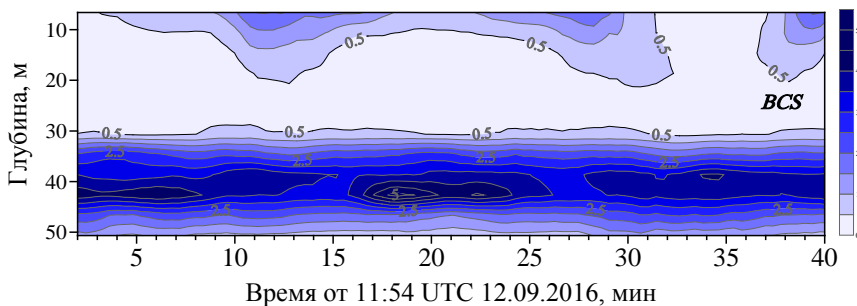
На рис.4 приведена временная развертка поперечного сечения обратного рассеяния (*BCS*, отн. ед.). Данный параметр выбран для обсуждения, так как хорошо согласуется с концентрацией взвешенного вещества [10]. Отметим, что причиной обратного рассеяния звука может быть взвешенное вещество [8, 18], морская биота [10, 11, 22] и микромасштабные флуктуации плотности [23 – 25]. В целом обратное рассеяние в озвученном объеме воды определяется неоднородностями акустического сопротивления. Для частоты 300 кГц резонансное обратное рассеяние будет происходить на частицах размерами около 2,5 мм.

В верхнем 10-метровом слое и в прибрежной зоне с глубиной моря менее 25 м значения *BCS* не превосходят 1. Области повышенного значения параметра (> 6), которые наблюдаются в слое глубин 15 – 25 м, имеют характерные горизонтальные размеры 100 – 200 м и потенциально могут быть вызваны антропогенным загрязнением. Эти области располагаются в окрестности изобаты 45 м. Выраженный звукорассеивающий слой на глубине 30 – 40 м, согласуется с положением сезонного термоклина и предположительно формируется биологическими организмами.



Р и с . 4 . Временная развертка поперечного сечения обратного рассеяния звука (BCS , отн. ед.) (а), вдольбереговой (U_n , см/с) (б) и нормальной берегу (V_n , см/с) (в) составляющих скорости течения на полигоне А.

Распределение вдольбереговой составляющей скорости течения ($U_n = U_{45}$, см. разясняющую вставку в левой части рис.4) выявляет незначительное ее усиление на горизонте 15 м в окрестности изобаты 35 м. В районах, удаленных от берега (9 мин), наблюдается слоистая вертикальная структура с максимальным значением сдвига в слое сезонного термоклина. Нормальная берегу составляющая ($V_n = V_{45}$) скорости течения проявляет выраженную слоистую вертикальную структуру в районах моря с глубиной более 25 м. Более детальный анализ динамики прибрежных вод у Гераклеи-



Р и с . 5 . Временная развертка поперечного сечения обратного рассеяния звука (BCS , отн. ед.) на полигоне В.

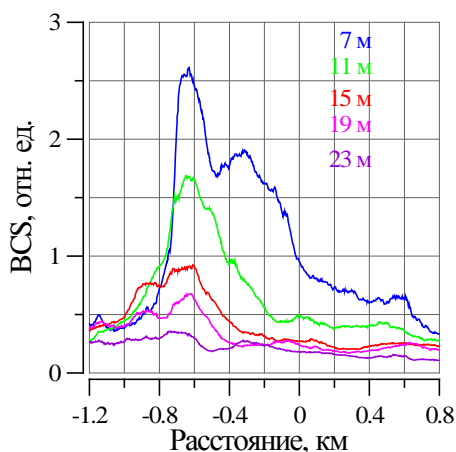


Рис. 6. Поперечное сечение обратного рассеяния звука (*BCS*, отн. ед.) в зависимости от расстояния на разных горизонтах западного разреза полигона В (ноль соответствует широте 44.5456° с.ш.).

ского п-ова по данным *ADCP*-измерений выходит за рамки статьи (см., например, [26]).

Микрополигон В. Начало измерений – 11:54 *UTC* 12 сентября 2016 г., конец – 12:35 *UTC* 12 сентября 2016 г. Временная развертка *BCS* приведена на рис.5. Здесь наблюдаются меньшие значения параметра, чем в прибрежной зоне. Хорошо выражен звукорассеивающий слой с центром на горизонте около 40 м, имеющий биологическое происхождение [27, 28]. В верхнем 20-метровом слое моря наблюдаются области повышенных значений параметра, которые, предположительно, имеют антропогенное происхождение и должны проявляться на спутниковых снимках.

На рис.6 приведены зависимости параметра *BCS* от расстояния на нескольких горизонтах западного разреза микрополигона В. С глубиной наблюдается хорошо выраженное уменьшение *BCS* и ширины неоднородности, что может быть следствием импульсного выброса легких сточных вод в окрестности концевой диффузора выпускной трубы или же вызывается действием иного источника взвешенного вещества, расположенного на поверхности моря.

На рис.6 приведены зависимости параметра *BCS* от расстояния на нескольких горизонтах западного разреза микрополигона В. С глубиной наблюдается хорошо выраженное уменьшение *BCS* и ширины неоднородности, что может быть следствием импульсного выброса легких сточных вод в окрестности концевой диффузора выпускной трубы или же вызывается действием иного источника взвешенного вещества, расположенного на поверхности моря.

Заключение. В данной статье приведены результаты *ADCP*-измерений, выполненных на ходу судна, которые показывают возможности использования прибора одновременно как профилометра течений, так и эхолота. Серии относительно коротких галсов в виде «змейки» позволили локализовать и определить пространственные размеры неоднородностей параметров обратного рассеяния звука. Соответствие обнаруженных неоднородностей областям антропогенного загрязнения может быть выяснено в результате совместной обработки результатов комплексных зондирований, выполненных в экспедиции. Использование прибора в условиях жесткого крепления к борту судна имеет проблемные вопросы в отношении измерения скорости течений, которые решаются на уровне специальной обработки первичных данных.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0010 и поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 гг.» (уникальный номер проекта RFMEFI557714X0110).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбак С.А., Серебряный А.Н. Нелинейные внутренние волны над наклонным дном: наблюдение акустическим профилометром // Акустический журнал.– 2011.– т.57, № 1.– С.85-91.
2. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Применение акустических доплеровских про-

- филометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // *Акустический журнал*.– 2012.– т.58, № 5.– С.639-648.
3. *Зимин А.В.* Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натуральных наблюдений // *Океанология*.– 2012.– т.52, № 1.– С.16-25.
 4. *Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О., Куклева О.Н., Соловьев Д.М.* Изменчивость течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // *Океанология*.– 2012.– т.52, № 5.– С.629-642.
 5. *Иванов В.А., Кузнецов А.С., Серебряный А.Н., Химченко Е.Е.* Исследования внутренних волн / Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. Иванова В.А., Дулова В.А.– Севастополь, 2014.– С.401-424.
 6. *Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Соловьев Д.М.* Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология*.– 2011.– т.51, № 4.– С.592-605.
 7. *Серебряный А.Н.* Сliko- и сулоеобразующие явления в море. Фронты различного происхождения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*.– 2012.– т.9, № 5.– С.231-240.
 8. *Gartner J.* 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.
 9. *Wall G.R., Nystrom E.A., Litten S.* Use of an ADCP to compute suspended-sediment discharge in the tidal Hudson River.– NY: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5055, 2006.– 16 p.
 10. *Flagg C.N., Smith S.L.* On the use of the acoustic Doppler current profiler to measure zooplankton abundance // *Deep Sea Res.*– 1989.– v.36, № 3.– P.455-474.
 11. *Cisewski B., Strass V.H., Rhein 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.*– 2010.– v.57, № 1.– P.78-94.
 12. *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.– v.61, № 6.– P.797-806.
 13. *Кузнецов А.С., Бондур В.Г., Иванов В.А., Морозов А.Н., Шаповалов Ю.И.* Исследование мелкомасштабной динамики вод в прибрежной зоне Крыма // *Окружающая среда и человек. Современные проблемы генетики, селекции и биотехнологии / Материалы международной конференции и молодежной научной конференции памяти член-корр. РАН Д.Г.Матишова (г.Ростов-на-Дону, 5-8 сентября 2016 г.)*.– Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2016.– С.199-202.
 14. *Gordon R.L.* Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation: A Practical Primer // *RD Instruments*, 1996.– 54 p.
 15. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Иванов В.А., Шутов С.А., Зима В.В.* Течения в Керченском проливе по данным ADCP наблюдений 2008 – 2009 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*.– Севастополь, 2010.– вып.22.– С.253-267.
 16. *Морозов А.Н., Павлов В.К.* Коррекция данных VMADCP // *Системы контроля окружающей среды*.– 2012.– вып.18.– С.7-10.

17. *Deines K.L.* Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profiler // Proceeding IEEE/OES 6th Working Conference on Current Measurement Technology, 1999.– P.259-264.
18. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М.* Оценка концентрации взвеси по данным ADCP WHM1200 // Системы контроля окружающей среды.– 2010.– вып.14.– С.42-46.
19. *Дулов В.А., Юровская М.В., Козлов И.Е.* Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // Морской гидрофизический журнал.– 2015.– № 6.– С.43-60.
20. *Овсяный Е.И., Романов А.С., Миньковская Р.Я., Красновид И.И., Озюменко Б.А., Цымбал И.М.* Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2001.– вып.2.– С.138-152.
21. *Парамонов А.Н., Кушниц В.М., Забурдаев В.И.* Современные методы и средства измерения гидрологических параметров океана.– Киев: Наукова думка, 1979.– 248 с.
22. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М.* Характеристики звукорассеивающего слоя Черного моря по данным LADCP-наблюдений // Морской гидрофизический журнал.– 2013.– № 4.– С.41-50.
23. *Goodman L.* Acoustic Scattering From Oceanic Microstructure // J. Geophys. Res.– 1990.– v.95 (C7).– P.11557-11573.
24. *Seim H.E., Gregg M.C., Miyamoto R.T.* Acoustic Backscatter from Turbulent Microstructure // J. Atm. and Ocean. Tech.– 1995.– v.12, № 2.– P.367-380.
25. *Ross T., Lueck R.* Sound scattering from oceanic turbulence // Geophys. Res. Letters.– 2003.– v.30, № 6.– 1343, doi: 10.1029/2002GL016733.– 4 p.
26. *Морозов А.Н., Иванов В.А., Шутов С.А., Зима В.В., Дерюшкин Д.В., Лемешко Е.М.* Пространственная структура течений у Гераклейского полуострова по данным ADCP-наблюдений 2015 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– Севастополь, 2016.– вып.1.– С.73-79.
27. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Ролик В.В.* Звукорассеивающие слои глубоководной части Черного моря, прилегающей к Крымскому полуострову, ADCP-наблюдения 2007 и 2008 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2012.– вып.26, т.1.– С.275-283.
28. *Иванов В.А., Морозов А.Н., Ролик В.В.* Звукорассеивающие слои Черного моря по данным ADCP-наблюдений 2004 – 2008 гг. // 3-й междунар. научно-практ. конф. «Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана». 14-15 мая 2013 г.– Запорожье: Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, 2013.– С.120-132.

Материал поступил в редакцию 25.01.2017 г.
После доработки 13.02.2017 г.

A.N.Morozov, V.A.Ivanov, S.A.Shutov, V.V.Zima, D.V.Deriushkin,
S.V.Fedorov, A.S.Kuznetsov, L.V.Verzhevskaya, E.V.Mankovskaya

**ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER AS AN ELEMENT OF
THE COMPLEX SYSTEM OF WATER ENVIRONMENT MONITORING
IN THE SEA COAST**

The results of ADCP measurements of current velocity performed by the special technique in the offshore shelf waters of the Heraklean Peninsula in September 2016 are discussed. The instrument was used as a current profiler and as a high-frequency echo sounder. Methodical aspects of measurements are considered. In the coastal waters in 15 – 25 m layer depths, inhomogeneities in the distribution of the cross section of backscattering of sound with typical horizontal scale of 100 – 200 m are well expressed. The coastline current is relatively increased on horizontal scales of 100 – 200 m nearby 45 m isobath. Normal velocity component has a layered vertical structure. In offshore waters, a sound-dispersing layer of biological origin is well defined on about 40 m level. In the upper 20 m layer, inhomogeneities in the distribution of the cross section of backscatter sound are revealed, which, presumably, have anthropogenic origin.

KEYWORDS: spatial structure of currents, cross-section of backscatter sound, coastal-shelf waters, ADCP, Heraklean Peninsula