

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ И КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКЕАНА

GIS AND CARTOGRAPHIC SUPPORT FOR OCEAN RESEARCH

УДК 551.465

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-5-15

А.Н. Морозов¹, Е.В. Маньковская²

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВОД В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ *LADCP*

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты предварительного анализа данных по течениям, собранных в четырнадцати крупномасштабных экспедициях Морского гидрофизического института в 2016–2019 гг. в северо-восточной части Черного моря. Показано, что использование погружаемого акустического доплеровского профилометра течений (LADCP) значительно повышает информативность экспедиционных материалов, открывая новые возможности в экспериментальном исследовании динамики вод. По материалам экспедиций установлено, что в районе проведения измерений верхний слой сдвиговых бароклинных течений ограничен глубиной залегания изопикны со значением потенциальной плотности ~16,75 кг/м³ (~350 м). На этой глубине наблюдается переход изменчивости с глубиной частоты плавучести от степенной к экспоненциальной зависимости. Этой же глубиной ограничивается проникновение сезонных вариаций средней кинетической энергии в толщу вод. Наибольшие значения средней кинетической энергии наблюдаются в апреле-мае и ноябредекабре, наименьшие – в июне-августе. Отношение максимальных значений энергии (весна, поздняя осень, зима) к ее минимальным значениям (лето) в верхнем слое составило ~3. Наиболее хорошо Основное черноморское течение выражено вблизи Крымского полуострова в весенний и зимний сезоны. Летом и осенью горизонтальное распределение скорости течения в слое глубин 30-80 м менее структурировано, что вызвано сезонной интенсификацией мезомасштабных процессов. На ряде станций профили скорости течения содержат фрагменты с хорошо выраженной гармонической изменчивостью компонент скорости течения с глубиной, которая может быть интерпретирована как проявление около инерционных внутренних волн. В большинстве случаев вращение вектора скорости течения с глубиной происходит по часовой стрелке, что определяет направление распространения около инерционных внутренних волн в толщу вод как основное. На примере одной из станций показан существенный вклад таких волн в значение вертикального сдвига скорости течения. Это обстоятельство позволяет предположить значительное влияние около инерционных внутренних волн на процессы вертикального турбулентного обмена в толще вод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Черное море, циркуляция вод, кинетическая энергия, около инерционные внутренние волны, вертикальный сдвиг скорости.

¹ Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, ул. Капитанская 2, 299011, Россия, *e-mail*: **anmorozov@mhi-ras.ru**

² Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, ул. Капитанская 2, 299011, Россия, *e-mail*: **emankovskaya@mhi-ras.ru**

Alexey N. Morozov¹, Ekaterina V. Mankovskaya²

MODERN STUDIES OF WATER DYNAMICS IN THE NORTH-WESTERN PART OF BLACK SEA FROM *LADCP* MEASUREMENTS

ABSTRACT

In this work a result of preliminary analysis of current measurements collected in fourteen large-scale expeditions of the Marine Hydrophysical Institute in 2016-2019 in the northeastern part of the Black Sea is presented. It is shown that the use of the Lowered Acoustic Doppler Current Profiler (*LADCP*) significantly increases the information content of the expedition materials, opening up new opportunities in the experimental study of water dynamics.

Based on the materials of the expeditions, it was found that the upper layer of shear baroclinic currents in the measurement area is limited by the isopycnic depth with a potential density of ~16.75 kg/m³ (~350 m). At this depth, the variability of the buoyancy frequency with the depth changes from a power-law to an exponential dependence. The same depth limits the penetration of seasonal variations of the average kinetic energy into the water column. The highest values of the average kinetic energy are observed in April-May and November-December, the lowest – in June-August. The ratio of the maximum energy values (summer) to its minimum values (spring, late autumn, winter) was ~3.

The Rim Black Sea Current is most pronounced near the Crimean Peninsula in the spring and winter seasons. In summer and autumn, the horizontal distribution of the current velocity in depths of 30–80 m is less structured, which is caused by the seasonal intensification of mesoscale processes.

At a number of stations, the current velocity profiles contain fragments with a welldefined harmonic variability of the current velocity components with depth, which can be interpreted as the manifestation of near-inertial internal waves. In most cases, the rotation of the current velocity vector with depth occurs clockwise, which determines the main direction of propagation of the inertial internal waves into the water column. The example of one of the stations shows the significant contribution of such waves to the value of shear. This fact suggests a significant influence of near-inertial internal waves on the processes of vertical turbulent exchange in the water column.

KEYWORDS: Black Sea, water circulation, kinetic energy, near-inertial internal waves, shear.

введение

Экспериментальное исследование динамики вод остается одной из важных задач прикладной океанологии на протяжении многих десятилетий. В настоящее время для решения этой задачи успешно используются акустические доплеровские профилометры течений (*ADCP*) в различных приложениях. Будучи установленными на автономных, донных или стационарных станциях, они позволяют исследовать временную эволюцию вертикальной структуры поля скорости течения в точке постановки. Смонтированные на судне (*Vessel Mounted ADCP*) такие приборы используются для исследования пространственной изменчивости поля скорости течения в верхнем слое моря вдоль пути следования. Технология использования профилометров в качестве погружаемого зонда (*Lowered ADCP*) дает уникальную возможность измерять профили скорости течения с борта дрей-

¹ Marine Hydrophysical Institute RAS, 2 Kapitanskaya st., Sevastopol, 299011, Russia, *e-mail:* **anmorozov@mhi-ras.ru**

² Marine Hydrophysical Institute RAS, 2 Kapitanskaya st., Sevastopol, 299011, Russia, *e-mail:* **emankovskaya@mhi-ras.ru**

фующего судна во всей толще вод моря, которая может значительно превышать рабочую дальность прибора. Первая *LADCP* станция была выполнена в 1989 г. [*Firing, Gordon,* 1990]. В последующие годы такая технология измерения профилей скорости течения стала стандартной при проведении экспедиционных работ и получила еще более широкое распространение после создания программного обеспечения обработки данных *LDEO* (*Lamont-Doherty Earth Observatory*) на основе метода инверсных решений [*Visbeck,* 2002].

В Морском гидрофизическом институте (МГИ) в практике экспедиционных работ *LADCP* используется с 2004 г. Кратко результаты использования прибора в северозападной части Черного моря в 2014 г. приведены в работе [*Morozov et al.*, 2017]. Начиная с 2016 г. институтом возобновлены регулярные крупномасштабные экспедиционные исследования в северо-восточном секторе моря. В настоящей работе представлены и обсуждаются результаты предварительного анализа материалов по измерению течений, собранных в современных экспедициях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

За период с 2016 по 2019 гг. Морским гидрофизическим институтом выполнено четырнадцать крупномасштабных экспедиций в северо-восточной части Черного моря на борту научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий». Количество станций в каждой съемке составляет 100–150. Схема расположения станций приведена на рис. 1. В левой нижней части рисунка приведена нумерация и время проведения экспедиций.



Puc. 1. Схема расположения станций в экспедициях МГИ 2016–2019 гг. Fig. 1. Map of stations in cruises of Marine Hydrophysical Institute in 2016–2019

В экспедициях *СТД*-измерения выполнялись зондом *SBE*911+. Профили температуры, солености и потенциальной плотности интерполировались на 1-метровую сетку по глубине. Для измерения скорости течения использовался *LADCP* на базе *WHM*300 производства *RDI*. Параметры работы прибора устанавливались следующие: опция *LADCP* включена в режиме «высокое разрешение/короткая дистанция», дискретность по времени – 1 с, по глубине – 4 м. Последовательность выполнения измерений включала выдержку прибора у поверхности моря на глубине ~3 м в течение 5 минут, дальнейшее его погружение со скоростью 0,5 м/с до глубины зондирования,

выдержку на этом горизонте в течение 5 мин. и последующий подъем на поверхность со скоростью 0,5 м/с.

Схема измерения профиля скорости течения приведена на рис. 2. Упрощенно обработка данных заключается в следующем. Каждый цикл измерения рассчитывается локальный профиль сдвига скорости течения, по окончании зондирования воспроизводится профиль сдвига во всем слое, который интегрируется, и неопределенная постоянная определяется с использованием *GPS*-данных навигационной системы судна. На практике обработка *LADCP*-данных выполняется с помощью программы *LDEO Software* версии *IX.12*. Программа адаптирована для условий проведения измерений в Черном море, позволяет рассчитать вертикальные профили скорости течения на глубоководных станциях в слое от ~30 м до глубины выполнения зондирования. В верхнем слое моря и на мелководных станциях (глубины до ~70 м) профиль скорости течения рассчитывается по данным выдержки *ADCP* у борта судна с помощью специализированного программного обеспечения, учитывающего влияние корпуса судна на показания компаса прибора.



Рис. 2. Положение прибора в составе зонда и схема измерений LADCP с борта дрейфующего судна

Fig. 2. The instrument position inside the probe and the LADCP measurement scheme from the board of the drifting vessel

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3. приведены примеры профилей горизонтальных компонент скорости течения и потенциальной плотности, полученные на двух станциях в первой экспедиции (01.07–18.07.2016). Измеренные *LADCP* вертикальные профили скорости течения, как правило, характеризуются большей изрезанностью в отличие от плавно меняющихся с глубиной скоростей геострофических течений, по форме близких к изменению потенциальной плотности с глубиной. Это обстоятельство определяется тем, что существенный вклад в изменчивость скорости течения вносят агеострофические процессы, в частности внутренние волны. Благодаря этому *CTD/LADCP*-данные, полученные с мелкомасштабным разрешением, часто используются для расчета коэффициента вертикальной турбулентной диффузии [*Naveira Garabato et al.*, 2004].



Рис. 3. Примеры профилей восточной (U) и северной (V) компонент скорости течения

Fig. 3. Examples of profiles of the eastern (U) and northern (V) components of the current velocity

Использование прибора в экспедициях позволяет получить представление о состоянии крупномасштабной циркуляции вод Черного моря и ее сезонной изменчивости. На рис. 4 в векторном виде представлены осредненные в слое глубин 30–80 м значения скорости течения, рассчитанные по материалам четырех экспедиций 2019 г. Основное черноморское течение наиболее хорошо выражено в весенний сезон вблизи Крымского полуострова. В летнее и осеннее время наблюдается ослабление крупномасштабной циклонической циркуляции и развитие мезомасштабных процессов (особенно в осенней экспедиции). В зимней экспедиции Основное черноморское течение наиболее хорошо выражено вблизи Крымского выражено вблизи Крымского полуострова.

Приведенная изменчивость горизонтальной структуры поля скорости от экспедиции к экспедиции, на качественном уровне, согласуется с работой [Зацепин и др., 2010] в части сезонной изменчивости бассейновой циркуляции и мезомасштабной динамики вод Черного моря. Получить более детальное представление о горизонтальной структуре поля скорости течений на основе собранных данных затруднительно из-за значительного пространственного (среднее расстояние между станциями ~20 км) и временного (продолжительность экспедиции 2–4 недели) разнесения измерений. Для детального исследования горизонтальной структуры поля скорости течения в верхнем слое моря лучше всего подходят судовые *ADCP*. Результаты таких измерений в Черном море обсуждаются в работе [*Oguz, Besiktepe*, 1999].

В настоящее время измерения, проводимые на фиксированных полигонах, предназначаются для верификации численных моделей. Ожидать сопоставимости отдельных профилей скорости течения измеренных и полученных в результате численных экспериментов не приходится, поскольку мелкомасштабные процессы, которые присутствуют в данных измерений, в моделях могут быть параметризованы. Для задач сопоставления более пригодным может быть осредненное по полигону вертикальное распределение кинетической энергии.



Рис. 4. Скорости течения, осредненные в слое 30–80 м для четырех экспедиций 2019 года (числовые маркеры в верхнем углу справа номера экспедиций)

Fig. 4. Current velocities averaged in 30–80 m layer for four expeditions in 2019 (numerical markers in the upper right corner are the expedition numbers)

В рамках предварительного анализа по всему ансамблю станций для каждой экспедиции было выполнено изопикническое осреднение кинетической энергии. На рис. 5 *а* приведены результаты такого осреднения для экспедиций, измерения в которых

выполнялись до глубин более 200 м. Экспедиции на рисунке представлены цветовой гаммой. Хорошо прослеживается уменьшение кинетической энергии в верхнем слое в летний период и ее возрастание в весенний и зимний периоды. Аппроксимирующие линейные зависимости, представленные на рисунке черным пунктиром, обращаются в ноль при значении потенциальной плотности 16,75 кг/м³.

Вертикальная структура плотностной стратификации также имеет особенность при плотности. На рис. 5 б приведены значении потенциальной профили данном потенциальной плотности и частоты плавучести, полученные в первой экспедиции (01.07-18.07.2016). Пунктиром на рисунке представлены аппроксимирующие зависимости: степенная (1) и экспоненциальная (2). Первая зависимость $N(z) = 1100 \cdot z^{-1.1}$ хорошо аппроксимирует профиль в слое от локального максимума частоты плавучести в основном пикноклине до глубины залегания изопикны со значением потенциальной плотности 16.75 кг/м³, аналогичная зависимость приводится в работе [Самодуров, 2016]. Вторая зависимость $N(z) = 2.9 \cdot Exp(-z/758)$ аппроксимирует профиль в слое ниже глубины залегания этой изопикны до 800 м. Отметим, что каноническая экспоненциальная зависимость частоты плавучести от глубины для океанических условий вдалеке от районов генерации внутренних волн представляется в следующем виде $N(z) = 3 \cdot Exp(-z/1300)$ [Garret, Munk, 1975]. Значительное различие в масштабах глубины (758 и 1300 м), возможно, является следствием различия глубины водоемов.



Рис. 5. Изопикнически осредненные по всему ансамблю станций профили кинетической энергии для каждой экспедиции (а) и профили потенциальной плотности и частоты плавучести для глубоководных станций экспедиции 1 (б)

Fig. 5. Kinetic energy profiles isopycnically averaged over the entire ensemble of stations for each expedition (a) and potential density and buoyancy frequency profiles for the deep-water stations of expedition 1 (b)

Хорошо известно, что внутренние волны оказывают доминирующее влияние на процессы вертикального турбулентного обмена. В Черном бесприливном море основным источником внутренних волн является ветер. Более 50 % энергии этих волн сконцентрировано вблизи локальной инерционной частоты. Вызванные ветром около инерционные внутренние волны распространяются в толщу вод, определяя большую

часть вертикального потока кинетической энергии, доступной для генерации турбулентности и вертикального перемешивания. Современные исследования спектральных характеристик вариаций скорости течения в Черном море, приведенные в работе [Клювиткин и др., 2019], показывают значимость инерционных колебаний как на 100-метровом горизонте, так и в глубинном слое на горизонте 1700 метров.

Измеренные профили скорости течения, в ряде случаев, содержат фрагменты с хорошо выраженным вращением вектора скорости течения с глубиной. Для примера на рис. 6 *а* приведен такой профиль, полученный на станции №140 (18:35 UTC 29.07.2019). В слое глубин 100–160 м наблюдается гармоническая изменчивость восточной и северной компонент скорости течения, соответствующая вращению вектора скорости с глубиной по часовой стрелке. Такое вращение вектора в северном полушарии означает распространение инерционной внутренней волны в толщу вод [*Leman, Sanford,* 1975]. Гармонические составляющие северной и восточной компонент скорости течения, представленные на рисунке пунктирными линиями, позволяют интерпретировать наблюдаемую изменчивость скорости течения с глубиной как около инерционную внутреннюю волну длиной ~60 м и амплитудой ~15 см/с, распространяющуюся вниз, на фоне относительно слабого течения со скоростью 1 – 2 см/с.



Рис. 6. Примеры профилей восточной (U) и северной (V) компонент скорости течения (a), годограф сдвига скорости (б) и фрагмент профиля компонент сдвига (в). Числовые маркеры на рис. 6 а – значения глубины



Прямые измерения профилей скорости течения позволяют увидеть вертикальную структуру инерционных колебаний и интерпретировать их как проявление около инерционных внутренних волн на горизонте наблюдения. С целью показать значимость около инерционных внутренних волн в формировании значения сдвига скорости течения $(ShU = \partial U/\partial z, ShV = \partial V/\partial z)$ на рис. 6 б приведен годограф (числовые маркеры – глубина), а на рис. 6 в – фрагмент профиля компонент вектора сдвига. Известно, что сдвиговая неустойчивость является основным механизмом генерации турбулентности. Наблюдения показывают, что значение сдвига во многом определяется около инерционными внутренними волнами. В конечном счете можно сказать, что около инерционные внутренние волны вносят значительный вклад в турбулентный вертикальный обмен в Черном море. Это направление требует более детального анализа имеющихся данных и/или проведения дополнительных измерений, направленных на исследование пространственной структуры около инерционных внутренних волн.

выводы

Результаты предварительного анализа данных по течениям, собранных в четырнадцати крупномасштабных экспедициях Морского гидрофизического института, выполненных в 2016–2019 гг. в северо-восточной части Черного моря, демонстрируют новые возможности экспериментального исследования динамики вод в широком диапазоне пространственно-временных масштабов с использованием погружаемого акустического доплеровского профилометра течений (*LADCP*).

На основе данных по течениям получены осредненные профили кинетической энергии для каждой экспедиции, которые могут быть использованы для верификации численных расчетов. Установлено, что в районе проведения измерений проникновение сезонных вариаций средней кинетической энергии в толщу вод ограничено глубиной залегания изопикны со значением потенциальной плотности ~16.75 кг/м³ (~350 м). На этой глубине наблюдается переход изменчивости с глубиной частоты плавучести от степенной к экспоненциальной зависимости.

В слое основного пикноклина выявлена почти линейная зависимость средней кинетической энергии от потенциальной плотности, ранее обнаруженная в северозападном секторе моря и на бровке свала глубин вблизи г. Геленджик. В верхнем слое моря наибольшие значения средней кинетической энергии наблюдаются в апреле-мае и ноябре-декабре, наименьшие – в июне-августе. Отношение максимальных значений энергии (весна, поздняя осень, зима) к ее минимальным значениям (лето) составило ~3.

Наиболее хорошо Основное черноморское течение выражено вблизи юговосточной части Крымского полуострова в весенний и зимний сезоны. Летом и осенью горизонтальное распределение скорости течения в слое глубин 30–80 м менее структурировано, что вызвано сезонной интенсификацией мезомасштабных процессов из-за ослабления крупномасштабной циклонической циркуляции.

На ряде станций профили скорости течения содержат фрагменты с хорошо выраженной гармонической изменчивостью компонент скорости течения с глубиной, которые могут быть интерпретированы как проявление около инерционных внутренних волн. В большинстве случаев вращение вектора скорости течения с глубиной происходит по часовой стрелке, что определяет направление распространения около инерционных внутренних волн в толщу вод как основное и подтверждает их ветровое происхождение.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам 0555-2021-0003 «Оперативная океанология» и 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования»

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out as part of a state assignments No 0555-2021-0003 "Operational Oceanology", No 0555-2021-0005 "Coastal Studies".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Станичный С.В., Бурдюгов В.М. Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием. Современные проблемы динамики океана и атмосферы. Сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П.С. Линейкина. Москва: Гидрометцентр России, 2010. С. 347–368.
- 2. *Firing E., Gordon R.* Deep ocean acoustic Doppler current profiling. Proc. IEEE 4th Working Conf. on Current Measurements. MD, IEEE, 1990. P. 192–201.
- 3. *Garret C., Munk W.* Space-Time Scales of Internal Waves: A Progress Report. Journal of Geophysical Research, 1975. V. 80. No 3. P. 291–297.
- 4. *Klyuvitkin A.A., Ostrovskii A.G., Lisitzin A.P., Konovalov S.K.* The energy spectrum of the current velocity in deep layers of the Black Sea. Doklady Earth Sciences, 2019. V. 488. No 2. P. 1222–1226. DOI: 10.1134/S1028334X1910012X.
- 5. *Leman D.K., Sanford T.B.* Vertical Energy Propagation of Inertial Waves: A Vector Spectral Analysis of Velocity Profiles. Journal of Geophysical Research, 1975. V. 80. No 15. P. 1975–1978.
- 6. *Morozov A.N., Lemeshko E.M., Shutov S.A., Zima V.V., Deryushkin D.V.* Structure of the Black Sea currents based on the results of the LADCP observations in 2004–2014. Physical Oceanography, 2017. Iss. 1. P. 25–40. DOI: 10.22449/1573-160X-2017-1-25-40.
- 7. Naveira Garabato A.C., Oliver K.I.C., Watson A.J., Messias M.-J. Turbulent diapycnal mixing in the Nordic seas. Journal of Geophysical Research, 2004. V. 109. Iss. C12. C12010. 9 p. DOI: 10.1029/2004JC002411.
- 8. *Oguz T., Besiktepe S.* Observations on the Rim Current structure, CIW, formation and transport in the western Black Sea. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, V. 46. Iss. 10. P. 1733-1754. DOI: 10.1016/S0967-0637(99)00028-X.
- 9. Samodurov A.S. Complimentarity of different approaches for assessing vertical turbulent exchange intensity in natural stratified basins. Physical Oceanography, 2016. Iss. 6. P. 32–42. DOI: 10.22449/1573-160X-2016-6-32-42.
- Visbeck M. Deep velocity profiling using Lowered Doppler Current Profilers: bottom track and inverse solutions. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002. V. 19. Iss. 5. P. 794-807. DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<0794: DVPULA> 2.0.CO;2.

REFERENCES

- 1. *Firing E., Gordon R.* Deep ocean acoustic Doppler current profiling. Proc. IEEE 4th Working Conf. on Current Measurements. MD, IEEE, 1990. P. 192–201.
- 2. *Garret C., Munk W.* Space-Time Scales of Internal Waves: A Progress Report. Journal of Geophysical Research, 1975. V. 80. No 3. P. 291–297.

- 3. *Klyuvitkin A.A., Ostrovskii A.G., Lisitzin A.P., Konovalov S.K.* The energy spectrum of the current velocity in deep layers of the Black Sea. Doklady Earth Sciences, 2019. V. 488, No 2. P. 1222–1226. DOI: 10.1134/S1028334X1910012X.
- 4. *Leman D.K., Sanford T.B.* Vertical Energy Propagation of Inertial Waves: A Vector Spectral Analysis of Velocity Profiles. Journal of Geophysical Research, 1975. V. 80. No 15. P. 1975–1978.
- 5. *Morozov A.N., Lemeshko E.M., Shutov S.A., Zima V.V., Deryushkin D.V.* Structure of the Black Sea currents based on the results of the LADCP observations in 2004-2014. Physical Oceanography, 2017. Iss. 1. P. 25–40. DOI: 10.22449/1573-160X-2017-1-25-40.
- 6. Naveira Garabato A.C., Oliver K.I.C., Watson A.J., Messias M.-J. Turbulent diapycnal mixing in the Nordic seas. Journal of Geophysical Research, 2004. V. 109. Iss. C12. C12010. 9 p. DOI: 10.1029/2004JC002411.
- 7. *Oguz T., Besiktepe S.* Observations on the Rim Current structure, CIW, formation and transport in the western Black Sea. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, V. 46. Iss. 10. P. 1733–1754. DOI: 10.1016/S0967-0637(99)00028-X.
- 8. *Samodurov A.S.* Complimentarity of different approaches for assessing vertical turbulent exchange intensity in natural stratified basins. Physical Oceanography, 2016. Iss. 6. P. 32–42. DOI: 10.22449/1573-160X-2016-6-32-42.
- 9. *Visbeck M.* Deep velocity profiling using Lowered Doppler Current Profilers: bottom track and inverse solutions. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002. V. 19. Iss. 5. P. 794-807. DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<0794: DVPULA>2.0. CO;2.
- Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V., Stanichny S.V., Burdyugov V.M. Black Sea basin-scale circulation and mesoscale dynamics under wind forcing. Modern problems of ocean and atmospheric dynamics. Collection of articles dedicated to the 100th anniversary of the birth of prof. P.S. Lineykina. Moscow: Hydrometeorological Center of Russia, 2010. P. 347–368 (in Russian).