

УДК 551.46

© А. Н. Морозов, Е. В. Маньковская

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь  
anmorozov@mhi-ras.ru, Emankovskaya@mhi-ras.ru**СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЙ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ  
ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ 2016 Г.**

Статья поступила в редакцию 23.05.2018, после доработки 09.11.2018.

Рассматриваются результаты совместной обработки данных по течениям и условной плотности, собранных в трех экспедициях, выполненных в 2016 г. в северной части Черного моря. Измерения профилей скорости течений производились с использованием погружаемого акустического доплеровского профилометра течений. Приводятся горизонтальные распределения течений. Обсуждаются характерные особенности вертикального распределения осредненной по ансамблю станций кинетической энергии в деятельном слое моря. Показано, что уменьшение кинетической энергии с глубиной наиболее быстро происходит в слоях сезонного и основного пикноклинов, проявляя почти линейную зависимость от условной плотности. Сезонная изменчивость значения осредненной кинетической энергии прослеживается до глубины залегания изопикны со значением условной плотности  $16.7 \text{ кг/м}^3$ . Приводятся изопикнически осредненные по ансамблю станций профили квадрата вертикального сдвига скорости течения. В слое основного пикноклина в окрестности максимума частоты плавучести отмечается максимум среднего значения квадрата сдвига для каждой экспедиции. Обсуждаются профили коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в слое основного пикноклина, полученные по мелкомасштабным данным с использованием параметризации G89. По данным трех экспедиций отмечается усиление процессов вертикального обмена с ростом глубины. Наибольшие значения коэффициента диапикнического обмена наблюдаются в летний сезон.

**Ключевые слова:** кинетическая энергия, сезонный пикноклин, основной пикноклин, вертикальное турбулентное перемешивание, Черное море.

A. N. Morozov, E. V. Mankovskaya

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**Seasonal variability of currents structure in the Black sea  
Northern part from field measurements in 2016**

Received 23.05.2018, in final form 09.11.2018.

This paper presents new results obtained during combined processing of the current and the conditional density measurements in three cruises in July, October and November 2016 in Northern part of Black sea. Current velocity profiles were measured using a Lowered Acoustic Doppler Current Profiler. The spatial distributions of current are presented. The specific features of the vertical distribution of kinetic energy averaged for all stations in the sea active layer are discussed. It is shown that the decrease of kinetic energy with depth occurs most rapidly in the layers of seasonal and permanent pycnoclines. It is established that there is an almost linear relation between kinetic energy and conditional density. The seasonal variability of average kinetic energy occurs to depth of isopycnic with the value of conditional density is  $16.7 \text{ kg/m}^3$ . The profiles of the squared vertical shear of current velocity isopycnically averaged from ensemble of stations are given. In the main pycnocline layer, in the vicinity of the buoyancy frequency maximum, the maximum of squared shear is noted for each expedition. The profiles of vertical turbulent diffusion coefficient in layers of permanent pycnocline derived from fine-scale data using G89 parameterization are discussed. According to date of three cruises the increasing of vertical exchange processes with depth growing is observed. The highest value of the coefficient diapycnal exchange occurred in the summer season.

**Keywords:** kinetic energy, seasonal pycnocline, permanent pycnocline, vertical turbulent exchange, Black Sea.

Ссылка для цитирования: Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Сезонная изменчивость структуры течений в северной части Черного моря по данным натурных наблюдений 2016 г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 1. С. 15—20.

For citation: Morozov A. N., Mankovskaya E. V. Seasonal variability of currents structure in the Black sea Northern part from field measurements in 2016. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 1, 15—20.

doi: 10.7868/S2073667319010027

Экспериментальные исследования динамики вод Черного моря остаются актуальной задачей на протяжении многих десятилетий. Современное развитие техники проведения океанологических измерений позволяет получать синхронные профили широкого набора гидрологических параметров, включая горизонтальные компоненты скорости течения, как в точке постановки автономной станции, так и с борта судна. Совместный анализ такого рода данных создает предпосылки для получения новых знаний о закономерностях изменчивости структуры течений и ее взаимосвязи с распределением других параметров морской среды.

В Черном море наиболее известны результаты использования автономного зонда-профилографа «Аквалог» [1]. Продолжительные ряды данных, полученные с его помощью в прибрежно-шельфовых водах вблизи г. Геленджик, позволили экспериментально исследовать процессы вентиляции [2], вертикального турбулентного обмена [3], вертикальную структуру течений [4].

Другой вид приборов – погружаемые акустические доплеровские профилометры течений (*Lowered Acoustic Doppler Current Profiler* — LADCP) [5, 6] в сочетании с CTD-зондированиями обеспечивают получение синхронных профилей скорости течения и ряда гидрологических параметров с борта судна. В настоящее время LADCP-измерения являются стандартной процедурой и широко используются в практике океанологических исследований [7].

Цель статьи — представить и обсудить результаты анализа LADCP/CTD-данных, полученных в трех экспедициях НИС «Профессор Водяницкий» (№ 1 — 87-й рейс 30.06—18.07, № 2 — 89-й рейс 30.09—20.10, № 3 — 91-й рейс 16.11—05.12), проходивших в северной части Черного моря в 2016 г.

**Данные и структура течений.** Для измерения течений в экспедициях использовался LADCP на базе WHM300 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 течении 5 минут, дальнейшее его погружение со скоростью 0,5 м/с до глубины зондирования, выдержку на этом горизонте в течении 5 минут и последующий подъем на поверхность со скоростью 0,5 м/с. Измеренные профили скорости течения начинались с 10 м глубины. При выдержке профилометра у поверхности моря обработка данных производилась с учетом влияния корпуса судна на показания магнитного компаса прибора, в соответствии с работой [8]. CTD-измерения выполнялись зондом SBE911+.

На рис. 1 в векторном виде представлены скорости течений на горизонте 20 м для всех станций трех экспедиций. Район проведения измерений соответствует северной части крупномасштабной циклонической циркуляции вод Черного моря, что проявляется в доминировании западного направления измеренных на станциях скоростей течений. В первой и третьей экспедициях отмечается увеличение скорости течений в районе свала глубин. Во второй экспедиции в западной части полигона распределение течений выявляет меандр Основного Черноморского течения с характерным масштабом ~60 км. Получить более подробное представление о горизонтальном распределении течений по данным экспедиций затруднительно из-за значительной их продолжительности (~20 сут) и разнесения измерений в пространстве (расстояние между станциями ~20 км).

**Вертикальное распределение кинетической энергии.** Ансамбли профилей скорости течений, полученные в экспедициях, позволяют выявить характерные черты осредненного вертикального распределения кинетической энергии (*EK*) в толще вод. На рис. 2, а сверху приведены осредненные профили *EK*, полученные по данным LADCP при его выдержке у поверхности моря. Числовые маркеры — номера экспедиций. Во время первых двух экспедиций плотностная стратификация верхнего слоя моря характеризовалась наличием сезонного пикноклина (пунктирные линии). Осреднение *EK* производилось относительно глубины залегания изопикны ( $h_{13}$ ) со значением условной плотности ( $\sigma_\theta$ )  $13 \text{ кг/м}^3$ , соответствующей максимуму частоты плавучести ( $N^2 = g/\rho \cdot \rho_z$ ,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\rho$  — плотность воды,  $\rho_z$  — производная плотности по глубине). Для первой экспедиции среднеквадратическое значение  $N_{13}$  составило 42 цикл/ч, при средней глубине залегания сезонного пикноклина ~13 м. Для второй экспедиции — 25 цикл/ч, при глубине залегания ~25 м. В третьей экспедиции толщина верхнего перемешанного слоя составляла 30—70 м, осреднение *EK* производилось по горизонтам.

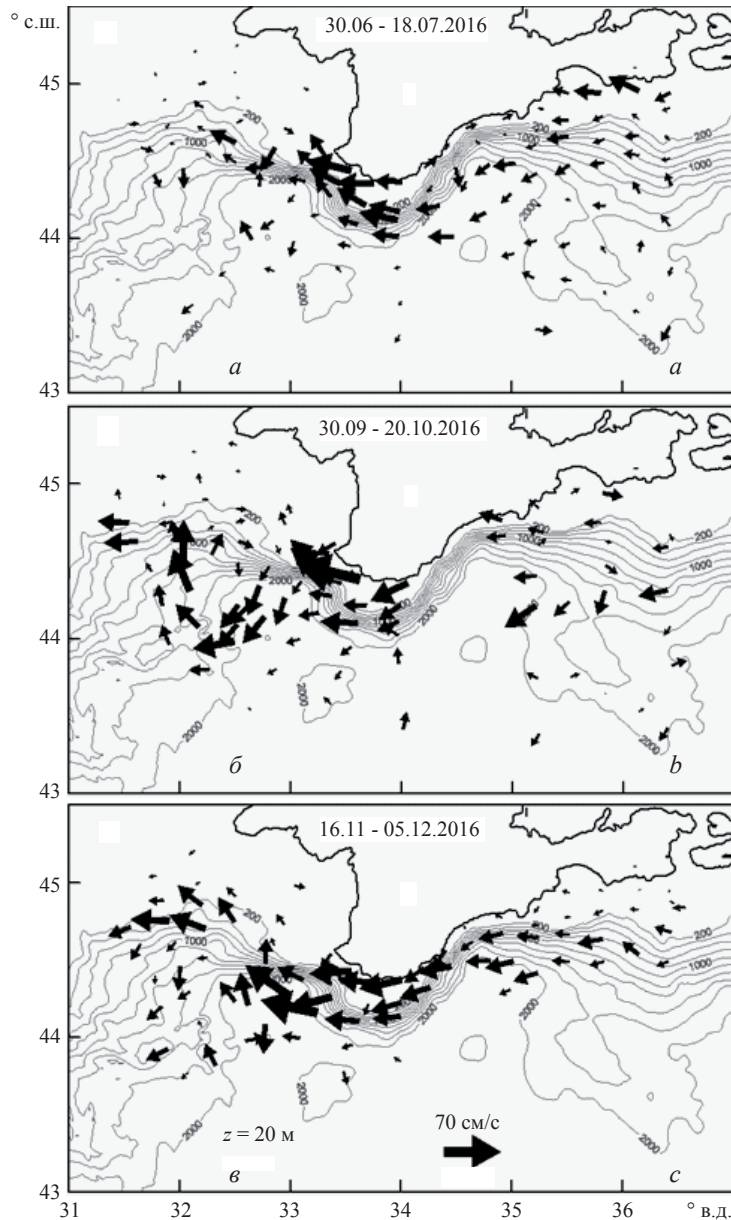


Рис. 1. Скорости течений на горизонте 20 м в экспедициях № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в).

Fig. 1. The current velocities on depth 20 m in cruises N 1 (a), N 2 (b), N 3 (c).

Для первых двух экспедиций в слое сезонного пикноклина с ростом глубины наблюдается резкое уменьшение значения  $EK$ , которое объясняется переходом ее части в потенциальную энергию ( $EP$ ), накапливаемую в отклонениях изопикны от положения равновесия. Потенциальная энергия, рассчитанная по соотношению  $EP = 0.5 \cdot \langle (h_{13} - \langle h_{13} \rangle)^2 \rangle \cdot \langle N_{13}^2 \rangle$  ( $\langle \dots \rangle$  — оператор осреднения по ансамблю станций), для первой экспедиции составила 0.02 Дж/кг, для второй — 0.4 Дж/кг, что сопоставимо со значениями кинетической энергии в сезонном пикноклине. Для экспедиции № 2 поверхность  $h_{13}$  проявляет устойчивую зависимость от широты и долготы. Потенциальная энергия, рассчитанная по соотношению  $EP = 0.5 \cdot \langle (h_{13} - S(\lambda, \phi))^2 \rangle \cdot \langle N_{13}^2 \rangle$  ( $S(\lambda, \phi)$  — поверхность второго порядка, полученная методом наименьших квадратов), составила 0.02 Дж/кг, что соответствует уменьшению кинетической энергии в сезонном пикноклине. В третьей экспедиции уменьшение значения кинетической энергии с глубиной происходит относительно медленно.

Приведенные осредненные профили  $EK$  показывают, что сезонный пикноклин значительно ограничивает передачу кинетической энергии в более глубокие слои моря за счет ее преобразования

в потенциальную энергию, накапливаемую в неровностях изопикнических поверхностей. От экспедиции к экспедиции в верхнем слое моря наблюдается рост значения кинетической энергии, что может объясняться сезонным усилением экмановской накачки [9] и разрушением сезонного пикноклина в результате осенне-зимней конвекции.

На рис. 2, а внизу приведены изопикнически осредненные профили  $EK$  (толстые линии) для трех экспедиций в слое основного пикноклина. Тонкие линии — профили условной плотности. На рис. 2, б приведены зависимости кинетической энергии и частоты плавучести от условной плотности. При осреднении использовались данные станций, выполненных на глубине моря не менее 1000 м. Для всех трех экспедиций наблюдается уменьшение значения кинетической энергии с глубиной. Профиль  $EK$  от условной плотности проявляет близкую к линейной зависимость, что свойственно и для других районов Черного моря [4]. Максимальная скорость уменьшения  $EK$  наблюдается при максимуме осредненной частоты плавучести. Это может объясняться переходом части кинетической в доступную потенциальную энергию, которая имеет максимум в слое основного пикноклина, и в сезон проведения экспедиций проявляет тенденцию к возрастанию [10]. Увеличение  $EK$  от экспедиции к экспедиции прослеживается до глубины залегания изопикны со значением условной плотности  $\sim 16.7 \text{ кг/м}^3$ , которая может рассматриваться как граница сдвиговых бароклинических течений в Черном море [3].

Приведенный на рис. 2 материал хорошо согласуется с упрощенной схемой энергетического бюджета в океане [10]. Поступление кинетической энергии в водную среду происходит в результате воздействия ветра на поверхность моря. При последующей передаче кинетической энергии в толщу вод часть ее переходит в доступную потенциальную энергию и часть затрачивается на диссипативные процессы.

**Параметры вертикального турбулентного перемешивания.** Синхронные профили скорости течения и условной плотности, измеренные с мелкомасштабным разрешением, позволяют оценить параметры вертикального турбулентного перемешивания [3]. На рис. 3 приведены профили изопикнически осредненных квадратов вертикальных сдвигов скорости течений ( $Sh^2 = U_z^2 + V_z^2$ ,  $U_z, V_z$  — производные по глубине восточной и северной компонент скорости течения) и частоты плавучести

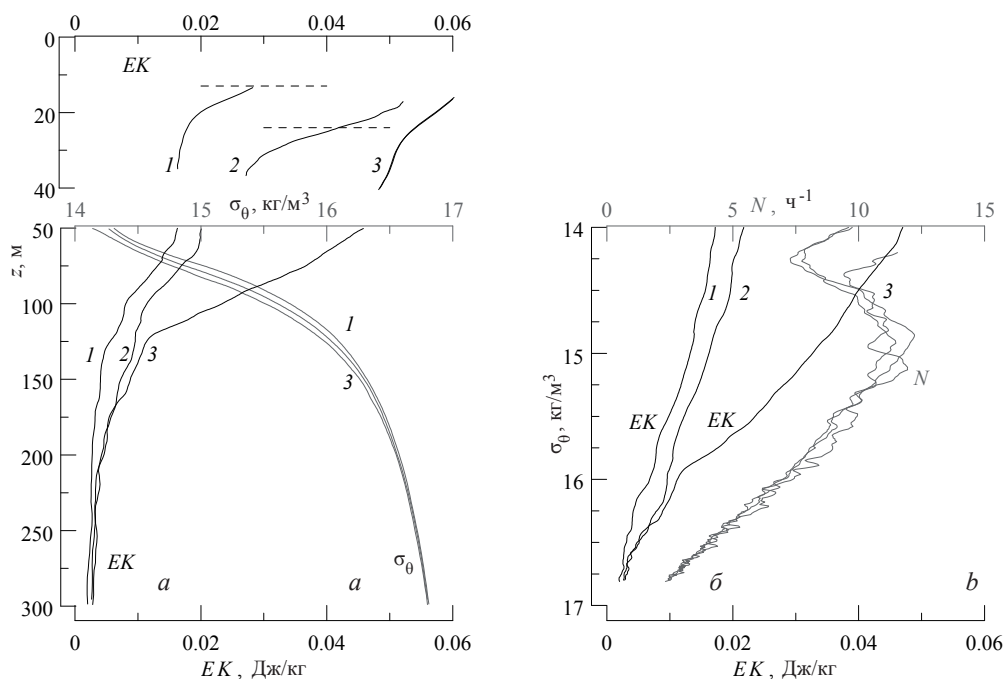


Рис. 2. Зависимости осредненной кинетической энергии  $EK$  (черные линии) от глубины (а) и условной плотности (б) для экспедиций № 1, № 2 и № 3. Номера кривых соответствуют номерам экспедиций. Серые линии – профили условной плотности (а) и частоты плавучести (б).

Fig. 2. Dependences of average kinetic energy (black line) from depth (a) and conditional density (b) for cruises N1, N2, N3 (curves 1, 2, 3 respectively). Grey lines are profiles of conditional density (a) and buoyancy frequency (b).

( $N^2$ ). В осредненных профилях положение максимума сдвигов скорости течения наблюдается в окрестности максимума частоты плавучести, в более глубоких слоях отмечается монотонное убывание их значений. Такие характерные черты осредненных профилей могут объясняться тем, что необходимое условие линейной неустойчивости сдвигового потока  $Ri < 0.25$  ( $Ri = N^2/Sh^2$  — градиентное число Ричардсона) [11], в слоях с большей плотностной стратификацией выполняется при больших значениях сдвигов скорости течения.

В рамках данной работы расчет коэффициента вертикальной турбулентной диффузии ( $K_V$ ) выполнялся на основе параметризации G89 [12]  $K_V \propto \left( \frac{Sh^2}{Sh_{GM76}^2} \right) (Sh_{GM76}^2)$  ( $Sh_{GM76}^2$  — квадрат сдвига скорости течения, оцененный по спектру Гаррета и Манка). На рис. 4 приведены профили  $K_V$ , рассчитанные по изопикнически осредненным профилям квадрата сдвига и квадрата частоты плавучести для трех экспедиций. В слое с максимальным значением частоты плавучести отмечается минимум  $K_V$ , в нижнем слое 100—300 м наблюдается постепенное увеличение параметра с глубиной. Отметим, что значения  $K_V$  по данным первой экспедиции, выполненной в летнее время, заметно превосходят значения по данным второй и третьей экспедиций. Это обстоятельство, предположительно, может быть следствием интенсификации мезомасштабных процессов [13] при ослаблении струи Основного черноморского течения в летнее время [10].

Полученные профили не проявляют максимума  $K_V$  на горизонте  $\sim 150$  м, выявленного на основе теоретических исследований [14]. В работе [3] оценки  $K_V$ , полученные на основе данных зонда-профилографа «Аквалог», показывают снижение его значения по мере увеличения глубины, что не согласуется с результатами данной статьи. Такая несогласованность, предположительно, является следствием региональных отличий механизмов вертикального обмена, измерения в работе [3] выполнялись в верхней части континентального склона Черного моря на изобате  $\sim 270$  м, в данной статье обсуждаются данные полученные при глубине моря не менее 1000 м.

\*\*\*

Данные по течениям, полученные в ходе трех экспедиций, позволили проследить сезонную изменчивость кинетической энергии в деятельном слое моря и установить характерные черты ее осредненного вертикального распределения. Приведенные в статье результаты показывают значительное уменьшение кинетической энергии с глубиной в сезонном и основном пикноклинах. Оценки

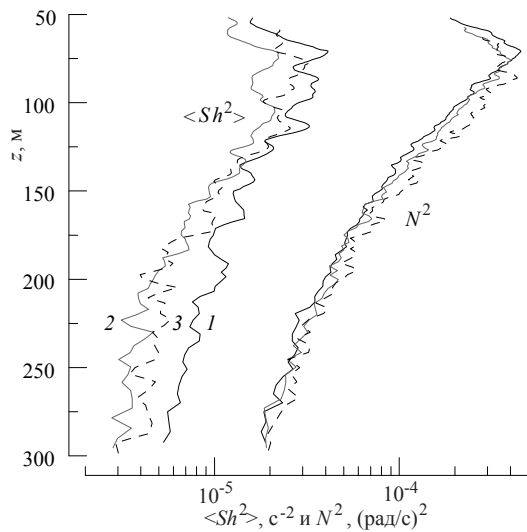


Рис. 3. Осредненные профили квадрата частоты плавучести  $N^2$  (тонкие линии) и квадрата сдвига скорости течения  $\langle Sh^2 \rangle$  (жирные линии) для трех экспедиций (кривые 1, 2, 3).

Fig. 3. The average profiles of buoyancy frequency square  $\langle N^2 \rangle$  (thin line) and shear square  $\langle Sh^2 \rangle$  (thick line) for three cruises (curves 1, 2, 3).

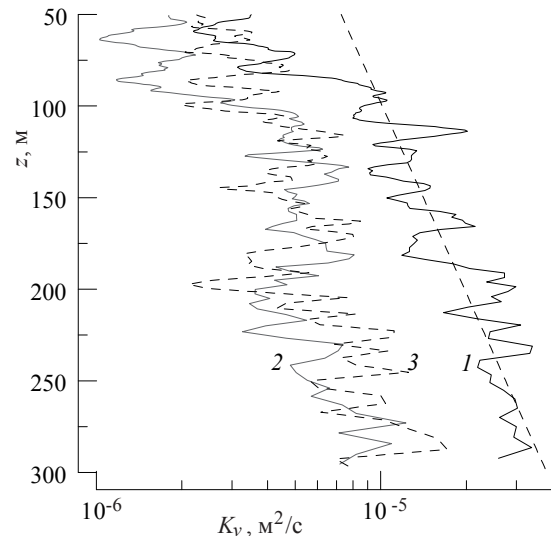


Рис. 4. Профили коэффициента вертикальной турбулентной диффузии для трех экспедиций (кривые 1, 2, 3).

Fig. 4. Profiles of vertical turbulent diffusion coefficient for three cruises (curves 1, 2, 3).

коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по данным, полученным с мелкомасштабным разрешением, выявили уменьшение его значения в слое максимума частоты плавучести и увеличение с ростом глубины.

*Работа выполнена в МГИ РАН в рамках государственного задания по темам № 0827-2018-0002 и № 0827-2018-0004.*

### Литература

1. *Островский А. Г., Зацепин А. Г., Соловьев В. А., Цибульский А. Л., Швоев Д. А.* Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной станции буйковой станции // *Океанология*. 2013. Т. 53, № 2. С. 259—268.
2. *Ostrovskii A. G., Zatsepin A. G.* Intense ventilation of the Black Sea pycnocline due to vertical turbulent exchange in the Rim Current area // *Deep-Sea Res. (part I)*. 2016. V. 116. P. 1—13.
3. *Подъёмов О. И., Зацепин А. Г., Островский А. Г.* Вертикальный турбулентный обмен в черноморском пикноклине и его связь с динамикой вод // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 4. С. 546—559.
4. *Морозов А. Н., Зацепин А. Г., Куклев С. Б., Островский А. Г., Федоров С. В.* Вертикальная структура течений в верхней части континентального склона Черного моря в районе Геленджика // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. № 6. С. 718—727.
5. *Firing E., Gordon R.* Deep ocean acoustic Doppler current profiling // *Proc. IEEE 4th Working Conf. on Current Measurements*. MD, IEEE, 1990. P. 192—201.
6. *Visbeck M.* Deep velocity profiling using Lowered Doppler Current Profilers: bottom track and inverse solutions // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2002. V. 19, N 5. P. 794—807.
7. *Фрейд Д. И.* Методика обработки данных глубоководных измерений на примере течений в абиссальных каналах // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 12, № 2. С. 25—33.
8. *Морозов А. Н., Лемешко Е. М.* Методические аспекты использования акустического доплеровского измерителя течений (ADCP) в условиях Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2006. № 4. С. 31—48.
9. *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* / Под ред. А. В. Фролова и Ю. Д. Реснянского. Москва: Гидрометцентр России, 2010. С. 347—368.
10. *Суворов А. М., Шокурова И. Г.* Годовая и десятилетняя изменчивость доступной потенциальной энергии в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. 2004. № 2. С. 29—41.
11. *Miles J. W.* On the stability of heterogeneous shear flows // *J. Fluid Mech.* 1961. V. 10, 4. P. 496—508.
12. *Gregg M. C.* Scaling turbulent dissipation in the thermocline // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94, C7. P. 9686—9698.
13. *Зацепин А. Г., Голенко Н. Н., Корж А. О., Кременецкий В. В., Пака В. Т., Поярков С. Г., Стунжас П. А.* Влияние динамики течений на гидрофизическую структуру вод и вертикальный обмен в деятельном слое Черного моря // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 3. С. 327—339.
14. *Самодуров А. С., Чухарев А. М., Носова А. В., Глобина Л. В.* Интенсификация внутренних волн в зоне сопряжения шельфа и континентального склона как фактор интенсификации вертикального обмена // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. Т. 6, № 2. С. 12—24.