

## Вертикальная структура сдвигов скорости течения в основном пикноклине Черного моря по данным натуральных наблюдений 2016 года

А. Н. Морозов

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
*E-mail: anmorozov@mhi-ras.ru*

Поступила в редакцию 06.06.2018 г., после доработки – 04.07.2018 г.

Обсуждаются характерные черты осредненной вертикальной структуры вертикальных сдвигов скорости течения на основе анализа *LADCP/CTD*-данных, собранных в трех экспедициях НИС «Профессор Водяницкий» в северной части Черного моря в 2016 г.: первая экспедиция – 87-й рейс (30 июня – 18 июля), вторая экспедиция – 89-й рейс (30 сентября – 20 октября), третья экспедиция – 91-й рейс (16 ноября – 5 декабря). В слое основного пикноклина в окрестности максимума частоты плавучести отмечается максимум среднего профиля сдвигов. Отношение среднего квадрата сдвига к среднему квадрату частоты плавучести почти монотонно возрастает с глубиной от 0,1 до 0,4 в слое 50–350 м, что на качественном уровне может указывать на относительное усиление процессов вертикального турбулентного перемешивания в нижней части основного пикноклина. Приводятся средние профили угла поворота вектора сдвига относительно его направления на горизонте 15 м. В среднем вектор сдвига вращается по часовой стрелке и совершает около двух оборотов в слое основного пикноклина. Выявленное вращение вектора сдвига объясняется влиянием распространяющихся в толщу вод внутренних волн с частотой, близкой к инерционной. Приведены годографы сдвига скорости течения, проявляющие хорошо выраженное вращение с глубиной. Рассмотрен пример расчета параметров квазинерционной внутренней волны по сдвигу скорости течения и деформации на основе данных одной из станций.

**Ключевые слова:** вертикальные сдвиги скорости течения, вертикальное турбулентное перемешивание, основной пикноклин, Черное море, *LADCP*.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-05-41102 РГО\_а.

**Для цитирования:** Морозов А. Н. Вертикальная структура сдвигов скорости течения в основном пикноклине Черного моря по данным натуральных наблюдений 2016 года // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 515–522. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-515-522

## Vertical Structure of Current Velocity Shears in the Main Pycnocline of the Black Sea Based on the *in situ* Data in 2016

A. N. Morozov

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*  
*e-mail: anmorozov@mhi-ras.ru*

The characteristic features of the averaged vertical structure of the current velocity shears are discussed based on the analysis of the *LADCP/CTD* data collected in three expeditions of the R/V “Professor Vodyanitsky” in the northern Black Sea in 2016: the 87<sup>th</sup> cruise (June, 30 – July, 18); the 89<sup>th</sup> cruise (September, 30 – October, 20) and the 91<sup>st</sup> cruise (November, 16 – December, 5). The maximum of the shear average profile is noted in the main pycnocline layer in the vicinity of the buoyancy frequency maximum. The ratio of the shear mean square to the buoyancy frequency mean square increases almost monotonously with depth from 0.1 to 0.4 in the layer 50–350 m that can indicate (at a qualitative level) relative intensification of turbulent vertical mixing in the lower part of the main pycnocline. The mean profiles of the shear vector rotation angle relative to its direction on the horizon 15 m are given. On the average, the shear vector rotates clockwise and makes about two rotations in the main

© Морозов А. Н., 2018

pycnocline layer. The revealed rotation of the shear vector is due to influence of the internal waves propagating downward at the close to inertial frequency. The hodographs of the current velocity shear exhibiting a well-pronounced rotation with depth are shown. Considered is the example of calculating the parameters of a near-inertial internal wave using the current velocity shear and deformation based on the data of one of the stations.

**Keywords:** vertical shears of current velocity, vertical turbulent mixing, main pycnocline, Black Sea, LADCP.

**Acknowledgements:** the investigation is carried out within the framework of the state task on the theme № 0827-2018-0002 “Development of the methods of operational oceanology based on the inter-disciplinary studies of the marine environment formation and evolution processes, and mathematical modeling using the data of remote and direct measurements” at a partial support of the RFFI grant № 17-05-41102 RGS a.

**For citation:** Morozov, A. N., 2018. Vertical structure of current velocity shears in the main pycnocline of the Black Sea based on the *in situ* data in 2016. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(6), pp. 515-522. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-515-522 (in Russian).

## Введение

Экспериментальное исследование процессов вертикального турбулентного обмена является одной из актуальных задач современной океанологии и определяется необходимостью получения оценок вертикальных потоков тепла, соли, биогенов, которые оказывают значительное влияние на формирование гидрологической структуры вод и функционирование морских экосистем [1]. В настоящее время для оценки параметров вертикального турбулентного перемешивания широко используются синхронные профили скорости течения и условной плотности, измеренные с мелкомасштабным разрешением [2–4]. Это направление экспериментальных исследований получило развитие в результате совершенствования техники профилирования течений. В частности, погружаемые акустические доплеровские профилометры течений (*LADCP*) позволяют проводить измерения профиля скорости течения с борта судна во всем слое зондирования [5, 6]. Существующие параметризации для расчета коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по мелкомасштабным данным [2, 7, 8] содержат квадраты вертикальных сдвигов скорости течения (далее по тексту – сдвигов), осредненных по ансамблю профилей. Применение той или иной параметризации требует понимания природы явлений, определяющих значения сдвигов в различных слоях моря.

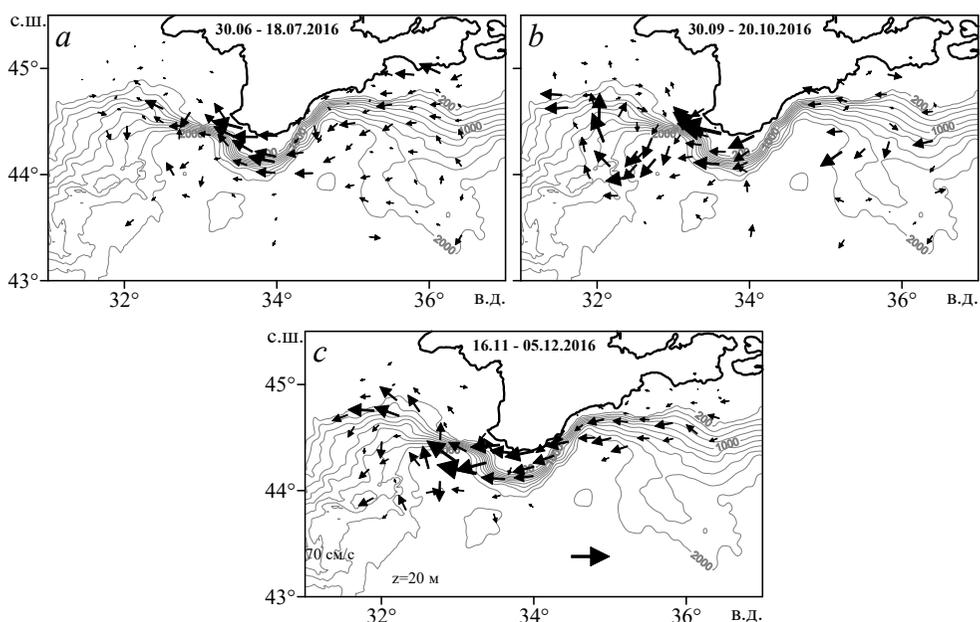
Цель настоящей работы – представить и обсудить осредненную вертикальную структуру сдвигов и природу ее формирования на основе анализа натурных данных, собранных в трех экспедициях НИС «Профессор Водяницкий» в северной части Черного моря в 2016 г. Первая экспедиция проводилась 30 июня – 18 июля (87-й рейс), вторая – 30 сентября – 20 октября (89-й рейс), третья – 16 ноября – 5 декабря (91-й рейс).

## Приборы и данные

Для измерения течений в экспедициях использовался *LADCP* на базе *WHM300* (рабочая частота 300 кГц) производства *RDI*. Параметры работы прибора: 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 в течение 5 мин, его дальнейшее 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. Обработка данных проводилась с учетом специфики вод Черного моря в соответствии с работой [9].

Координаты судна определялись по данным *GPS*, *CTD*-измерения выполнялись зондом *SBE911+*.

Результаты измерения скорости течения в трех экспедициях на горизонте 20 м приведены в векторном виде на рис. 1. Район проведения измерений располагался в северной части крупномасштабной циклонической циркуляции вод Черного моря, что проявляется в доминировании западного направления измеренных скоростей течений. В первой и третьей экспедициях отмечается относительное увеличение скорости течений в районе свала глубин. Во второй экспедиции в западной части полигона наблюдается меандр Основного Черноморского течения с характерным масштабом ~60 км. Более детальное обсуждение горизонтальной структуры скорости течений выходит за рамки статьи, оно частично представлено в работе [10].



**Рис. 1.** Скорости течения на горизонте 20 м в трех экспедициях (первая – *a*, вторая – *b*, третья – *c*)  
**Fig. 1.** Current velocities on the 20 m horizon obtained in tree expeditions (the first – *a*, the second – *b*, the third – *c*)

### Вертикальная структура сдвигов в слое основного пикноклина

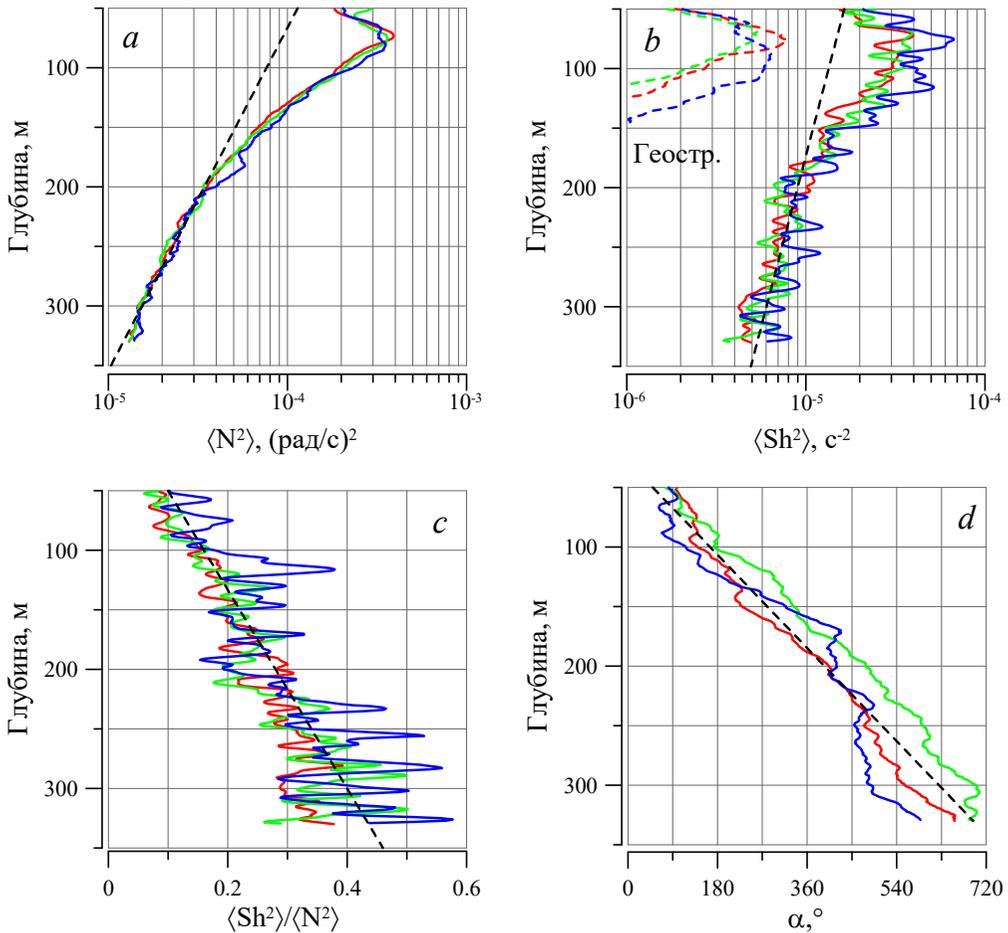
Осреднение параметров, приведенных на рис. 2, выполнялось по ансамблю профилей, полученных на станциях при глубине моря не менее 1000 м в каждой из трех экспедиций (64, 41, 30 – число профилей для первой, второй и третьей экспедиции соответственно). На рис. 2, *a* приведен средний профиль квадрата частоты плавучести ( $N^2 = g\rho^{-1}\rho_z$ , где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  – плотность морской воды;  $\rho_z$  – производная плотности по глубине). Максимум  $\langle N^2(z) \rangle$  отмечается на глубине ~75 м и соответствует средней глубине залегания изопикны со значением условной плотности

15 кг/м<sup>3</sup>. Черная штриховая линия – экспонента, аппроксимирующая профиль в слое 200–300 м ( $\langle N^2(z) \rangle \propto \exp(-z/125)$ ). На рис. 2, *b* показан средний профиль квадрата сдвига ( $Sh^2 = U_z^2 + V_z^2$ , где  $U_z, V_z$  – производные по глубине восточной  $U$  и северной  $V$  компонент скорости течения). Цветные штриховые линии – квадраты рассчитанных по геострофическим соотношениям сдвигов, осредненные по 10 парам станций каждой экспедиции с их наибольшими значениями в окрестности максимума частоты плавучести. Черная штриховая линия – аппроксимирующая экспонента ( $\langle Sh^2(z) \rangle \propto \exp(-z/250)$ ). Черные штриховые линии на рис. 2, *a, b* подчеркивают относительное возрастание среднего квадрата сдвига в окрестности максимума частоты плавучести. Наблюдаемое увеличение среднего значения сдвига может быть следствием того, что в слоях с большим значением частоты плавучести необходимое условие линейной неустойчивости сдвигового потока (градиентное число Ричардсона  $Ri = N^2/Sh^2 < 0,25$  [11]) выполняется при больших значениях сдвига. Также отклонение профиля сдвигов от монотонного убывания с глубиной может объясняться вкладом геострофических сдвигов (рис. 2, *b*) и изменчивости течений в частотном диапазоне меньше локальной инерционной частоты ( $f$ ). Если бы значения сдвигов определялись исключительно внутренними волнами, то такое поведение профиля в окрестности максимума частоты плавучести означало бы их интенсификацию, что не согласуется с данными автономных буйковых станций [12].

В задачах, связанных с определением параметров вертикального перемешивания, важным является, в конечном счете, отношение квадрата сдвига к квадрату частоты плавучести. На рис. 2, *c* приведен профиль  $\langle Sh^2 \rangle / \langle N^2 \rangle$ , который показывает увеличение параметра с ростом глубины, что на качественном уровне ( $K_V \propto (Sh^2/N^2)^2$  [8]) может восприниматься как усиление процессов вертикального турбулентного перемешивания в нижней части основного пикноклина.

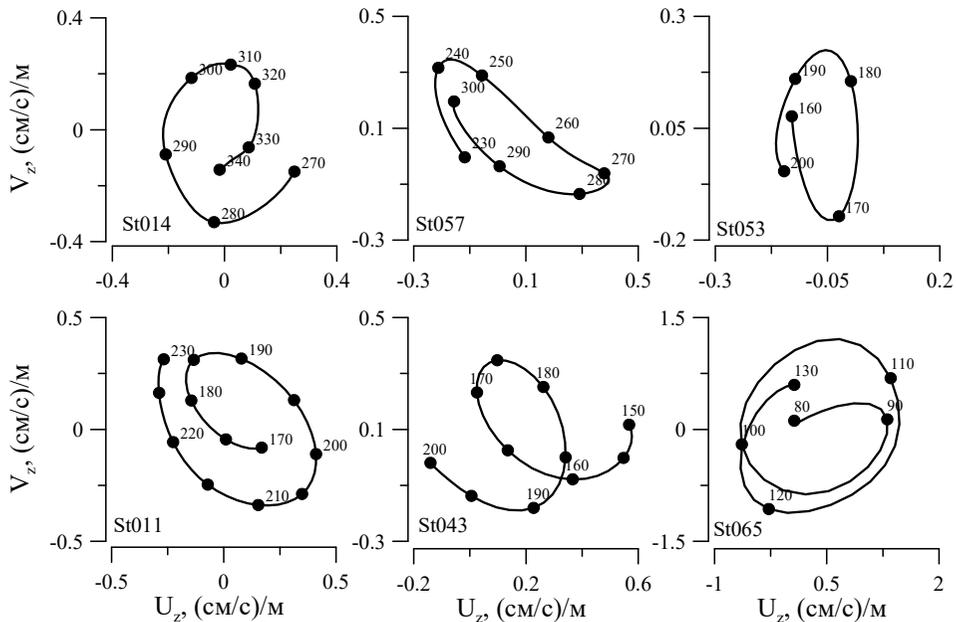
На рис. 2, *d* приведены средние профили угла поворота ( $\alpha$ ) вектора сдвига относительно его направления на горизонте 15 м для каждой экспедиции. Средние профили  $\alpha$  показывают вращение вектора сдвига по часовой стрелке с глубиной почти на два оборота в слое 50–350 м. Это обстоятельство может объясняться значимостью вклада инерционных колебаний в формирование вертикальной структуры сдвигов. Инерционные колебания возбуждаются в верхнем слое моря в результате ветрового воздействия [13] и распространяются в толщу вод как внутренние волны с частотой, близкой к инерционной. Такие волны взаимодействуют с неоднородностями поля скорости устойчивых течений [14]. В Северном полушарии эти волны при распространении вниз характеризуются вращением вектора скорости (а следовательно, и ее сдвига) по часовой стрелке [15]. В ряде профилей вращение сдвига

с глубиной ярко выражено. Для примера на рис. 3 приведены годографы сдвига в различных слоях моря на разных станциях в третьей экспедиции. В подавляющем большинстве случаев наблюдается вращение по часовой стрелке. Другой отличительной чертой внутренних волн с частотой, близкой к инерционной, является малая потенциальная энергия. Попытка оценить потенциальную энергию на одной из станций сводилась к следующему.



**Р и с. 2.** Осредненные профили квадрата частоты плавучести (a), квадрата вертикального сдвига скорости течения (b), отношения квадрата сдвига к квадрату частоты плавучести (c), угла поворота вектора сдвига скорости течения (d). Первая экспедиция – красные линии, вторая экспедиция – зеленые линии, третья экспедиция – синие линии

**Fig. 2.** Averaged profiles of the buoyancy frequency square (a), square of the current velocity vertical shear (b), relation of the shear square to the buoyancy frequency square (c), turning angle of the current velocity shear vector (d). The first expedition – red lines, the second expedition – green lines, the third expedition – blue lines



**Р и с. 3.** Годографы вертикального сдвига скорости течения на разных станциях в третьей экспедиции (числовые маркеры – глубина)

**F i g. 3.** Hodographs of the current velocity vertical share at different stations in the third expedition (numerical markers denote depth)

На рис. 4, *a* приведены фрагменты профилей компонент сдвига в слое с хорошо выраженным вращением вектора сдвига по часовой стрелке (рис. 3, St065). Для единичной внутренней волны отношение кинетической и потен-

циальной энергий ( $R_\omega$ ) может быть определено из соотношения  $R_\omega = \frac{Sh^2}{N^2 \eta_z^2}$ ,

где  $\eta_z = \frac{N^2 - N_{fit}^2}{N_{fit}^2}$  – деформация (производная по глубине смещения изо-

пикны от положения равновесия),  $N_{fit}$  – частота плавучести в равновесном состоянии [16, 17]. На рис. 4, *b* профиль измеренного значения  $N^2$  показан

серой сплошной линией, линейная зависимость  $N_{fit}^2$  – серой штриховой линией, измеренный профиль  $\xi(z) = N_{fit}^2(z) \eta_z$  – черной штриховой линией. От-

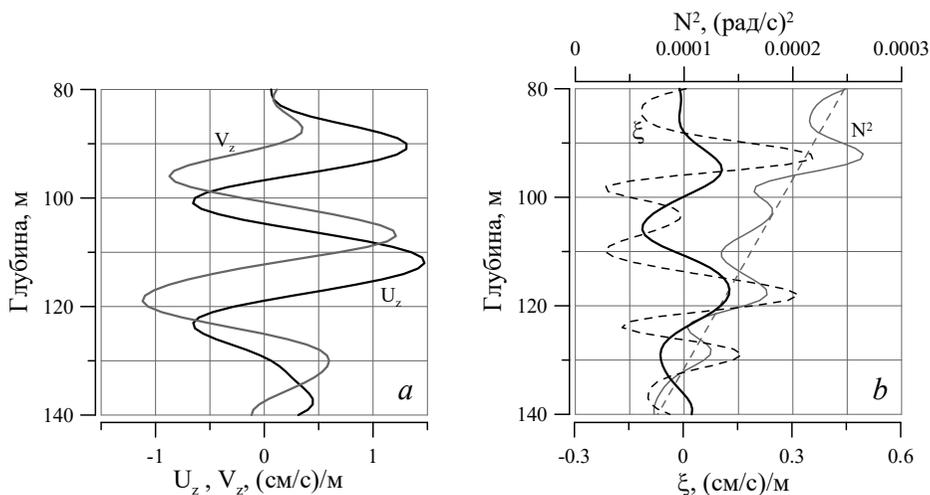
ношение энергий рассчитывалось как  $R_\omega^{-1} = a^2 + b^2 = 0,0126$ , где  $a$  и  $b$  опреде-

лялись методом наименьших квадратов из соотношения  $\xi(z) = aShU(z) + bShV(z)$  (черная сплошная линия на рис. 4, *b*). Оценка частоты

наблюдаемой волны может быть получена из соотношения  $R_\omega = \frac{(\omega^2 + f^2)(N^2 - \omega^2)}{N^2(\omega^2 - f^2)} \Rightarrow \{N \gg \omega, \omega = (1 + \delta)f, \delta \ll 1\} \Rightarrow \delta \approx \langle R_\omega \rangle^{-1} \Rightarrow \omega \approx 1,0126f$ .

Результат анализа фрагмента профиля показывает, что хорошо выраженное

вращение вектора сдвига с глубиной по формальным признакам соответствует волне с частотой, близкой к инерционной.



**Р и с. 4.** Фрагменты профилей сдвигов скорости течения (а), частоты плавучести и деформации (б)

**F i g. 4.** Profile fragments of the current velocity shears (а), and the buoyancy and deformation frequency (б)

Качественная оценка значимости вклада инерционных внутренних волн в сдвиги в Черном море согласуется с данными, полученными на автономных буйковых станциях в различных районах Мирового океана и показывающими наличие выраженного максимума спектра сдвигов в окрестности локальной инерционной частоты [18, 19].

### З а к л ю ч е н и е

На основе анализа материалов трех экспедиций выявлены характерные черты осредненной вертикальной структуры сдвигов в перманентном пикноклине северной части Черного моря. Основной особенностью среднего вертикального профиля сдвигов является наличие максимума в окрестности максимума частоты плавучести. Среднее отношение сдвигов к частоте плавучести в слое 50–350 м показывает почти монотонное возрастание с глубиной. В среднем поворот вектора сдвига с глубиной происходит по часовой стрелке, что может быть следствием существенного влияния внутренних волн с частотой, близкой к инерционной, на формирование вертикальной структуры сдвигов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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 Research I*. 2016. Vol. 116. P. 1–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2016.07.011>
2. *Global Abyssal Mixing Inferred from Lowered ADCP Shear and CTD Strain Profiles / E. Kunze [et al.]* // *Journal of Physical Oceanography*. 2006. Vol. 36. P. 1553–1576. <http://dx.doi.org/10.1175/JPO2926.1>

3. Морозов А. Н., Лемешко Е. М. Оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по данным CTD/LADCP-измерений в северо-западной части Черного моря в мае 2004 года // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 1. С. 58–67.
4. Подымов 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. doi:10.7868/S0030157417040049
5. Firing E., Gordon R. Deep ocean acoustic Doppler current profiling // Proceedings IEEE 4th Working Conference on Current Measurement, April 3–5, 1990. MD, IEEE, 1990. P. 192–201.
6. Visbeck M. Deep Velocity Profiling Using Lowered Acoustic Doppler Current Profilers: Bottom Track and Inverse Solutions // Journal of Atmospheric Oceanic Technology. 2002. Vol. 19. P. 794–807. doi:10.1175/1520-0426(2002)019<0794:DVPULA>2.0.CO;2
7. Munk W., Anderson E. Notes on a theory of the thermocline // Journal of Marine Research. 1948. Vol. 3. P. 267–295.
8. Gregg M. C. Scaling turbulent dissipation in the thermocline // Journal of Geophysical Research. 1989. Vol. 94, iss. C7. P. 9686–9698. http://dx.doi.org/10.1029/JC094iC07p09686
9. Морозов А. Н., Лемешко Е. М. Методические аспекты использования акустического доплеровского измерителя течений (ADCP) в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2006. № 4. С. 31–48.
10. Циркуляция вод северной части Черного моря в летний сезон 2016 года (по материалам 87-го рейса НИС «Профессор Водяницкий») / Ю. В. Артамонов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 1. С. 57–70. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-57-70
11. Miles J. W. On the stability of heterogeneous shear flows // Journal of Fluid Mechanics. 1961. Vol. 10, iss. 4. P. 496–508. doi:10.1017/S0022112061000305
12. Морозов А. Н. Спектральные характеристики инерционных колебаний в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2001. Вып. 2. С. 61–69.
13. Pollard R. T., Millard Jr. R. C. Comparison between observed and simulated wind-generated inertial oscillations // Deep-Sea Research. 1970. Vol. 17. P. 153–175.
14. Kunze E. Near-Inertial Wave Propagation in Geostrophic Shear // Journal of Physical Oceanography. 1985. Vol. 15. P. 544–565.
15. Leaman K. D., Sanford T. B. Vertical Energy Propagation of Inertial Waves: A Vector Spectral Analysis of Velocity Profiles // Journal of Geophysical Research. 1975. Vol. 80, no. 15. P. 1975–1978.
16. Polzin K. L., Toole J. M., Schmitt R. W. Finescale Parameterizations of Turbulent Dissipation // Journal of Physical Oceanography. 1995. Vol. 25. P. 306–328.
17. Alford M. H., Gregg M. C. Near-inertial mixing: Modulation of shear, strain and microstructure at low latitude // Journal of Geophysical Research. 2001. Vol. 106, no. C8. P. 16947–16968.
18. MacKinnon J. A., Gregg M. C. Near-Inertial Waves on the New England Shelf: The Role of Evolving Stratification, Turbulent Dissipation, and Bottom Drag // Journal of Physical Oceanography. 2005. Vol. 35. P. 2408–2424.
19. Role of Near-Inertial Waves in Subthermocline Diapycnal Mixing in the Northern Gulf of Mexico / Z. Jing [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 2015. Vol. 45. P. 3137–3154. doi:10.1175/JPO-D-14-0227.1

*Об авторе:*

**Морозов Алексей Николаевич**, старший научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID: 0000-0001-9022-3379**, anmorozov@mhi-ras.ru