

УДК 551.466

© А. Н. Морозов*, Е. В. Маньковская, С. В. Федоров

Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Капитанская ул., 2, г. Севастополь, Россия

*E-mail: anmorozov@mhi-ras.ru

ИНЕРЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Статья поступила в редакцию 04.09.2020, после доработки 24.11.2020

На основе анализа двух видов натуральных данных по течениям обсуждаются характерные свойства инерционных колебаний в деятельном слое северной части Черного моря. Результаты спектрального анализа ~ 100 -суточных рядов пульсаций скорости течения на пяти горизонтах (35–350 м) автономной буйковой станции показали, что в полосе частот $2/3f \div 3/2f$ вблизи локальной инерционной частоты f сконцентрировано не менее 70 % кинетической энергии внутриволнового диапазона, как и в других районах Мирового океана. Характерной особенностью вертикального распределения энергии инерционных колебаний является ее наиболее быстрое убывание в окрестности максимума частоты плавучести в основном пикноклине. Такое изменение энергии с глубиной подтверждает экранирующее действие основного пикноклина, ограничивающее проникновение инерционных колебаний в глубинные слои моря. Впервые установлено, что доля энергии инерционных колебаний в общей кинетической энергии растет с глубиной (от 8.5 % на горизонте 50 м до 19 % на горизонте 350 м). Это обстоятельство подчеркивает возрастание роли инерционных колебаний в динамике вод глубинных слоев моря. Характерный временной масштаб затухания инерционных колебаний в основном пикноклине составил ~ 170 ч, выше пикноклина ~ 55 ч, ниже — ~ 70 ч. Относительное увеличение параметра в основном пикноклине означает обострение инерционного пика на спектре, что является характерным для других районов Мирового океана, и может объясняться уменьшением групповой скорости около инерционных внутренних волн за счет их взаимодействия с геострофическими потоками. Непрерывные профили, полученные с использованием погружаемого доплеровского профилометра течений, показали преобладание вращения вектора сдвига скорости с глубиной по часовой стрелке, что определяет направление распространения около инерционных внутренних волн вниз, как доминирующее, и подтверждает их ветровое происхождение. Наблюдаемая длина около инерционных внутренних волн составила 20–50 м по вертикали. Средняя продолжительность пакета волн ~ 1.5 длины волны.

Ключевые слова: около инерционные внутренние волны, измерения скорости течения, акустический доплеровский профилометр течений, Черное море.

© А. Н. Морозов*, Е. В. Маньковская, С. В. Федоров

Marine Hydrophysical Institute of RAS, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, Russia

*E-mail: anmorozov@mhi-ras.ru

INERTIAL OSCILLATIONS IN THE NORTHERN PART OF THE BLACK SEA BASED ON THE FIELD OBSERVATIONS

Received 04.09.2020, in final form 24.11.2020

The characteristic properties of inertial oscillations in the active layer in the northern part of the Black Sea are discussed based on the analysis of two types of currents measurement data. The results of spectral analysis of the ~ 100 -day series of current velocity pulsations at five horizons (35–350 m) of the autonomous buoy station showed that no less than 70 % of the kinetic energy of the internal waveband is concentrated in the frequency band $2/3f \div 3/2f$ near the local inertial frequency f , as is in other regions of the World Ocean. A characteristic feature of the vertical distribution of the inertial oscillation energy is its fastest decrease in the vicinity of the maximum buoyancy frequency in the main pycnocline. This change in energy with depth confirms the shielding effect of the main pycnocline, which limits the penetration of inertial oscillations into the deep layers of the sea. For the first time, it was established that the ratio of inertial oscillation energy in the total kinetic energy increases with depth (from 8.5 % at the horizon of 50 m to 19 % at the horizon of 350 m). This circumstance highlights the increasing effect of inertial oscillations on the dynamics of deep sea waters. A characteristic damping time of inertial oscillations in the main pycnocline was ~ 170 h, above pycnocline ~ 55 h, lower ~ 70 h. This relative increase in the main pycnocline means an aggravation of the inertial peak in the spectrum, which

Ссылка для цитирования: Морозов А.Н., Маньковская Е.В., Федоров С.В. Инерционные колебания в северной части Черного моря по данным натуральных наблюдений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 1. С. 43–53. doi: 10.7868/S2073667321010044

For citation: *Morozov A.N., Mankovskaya E.V., Fedorov S.V. Inertial Oscillations in the Northern Part of the Black Sea Based on the Field Observations. Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, 14, 1, 43–53. doi: 10.7868/S2073667321010044

is typical for other regions of the World Ocean and can be explained by a decrease in the group velocity of near-inertial internal waves due to their interaction with geostrophic flows. Continuous profiles obtained by Lowered Doppler Current Profiler showed a predominance of rotation of the velocity shift vector with depth in a clockwise direction, which determines the downward direction of propagation of inertial internal waves as dominant, and confirms their wind origin. The observed length of the near-inertial internal waves was 20–40 m vertically. The average duration of a wave packet is ~ 1.5 wavelength.

Key words: near-inertial internal waves, current velocity measurements, acoustic Doppler current profiler, Black Sea.

1. Введение

Инерционные колебания представляют собой наиболее интенсивный вид движения вод в частотном диапазоне внутренних волн (ВВ). В океане в среднем почти половина кинетической энергии ВВ концентрируется вблизи локальной инерционной частоты [1]. Вызванные ветром в верхнем однородном слое моря инерционные колебания [2] распространяются в толщу вод как около инерционные ВВ, определяя большую часть вертикального потока энергии доступной для генерации турбулентности и вертикального перемешивания [3]. По мере проникновения в глубокие слои моря такие волны взаимодействуют с неоднородностями поля скорости течения, вызванными разномасштабными динамическими процессами, в частности, струйными течениями, их меандрами, циклоническими и антициклоническими вихрями [4, 3]. Вопросы, связанные с распространением и механизмами диссипации энергии почти инерционных ВВ, многие годы остаются предметом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований [5–14].

Существует два основных, приблизительно равных по мощности, источника ВВ: приливы и ветер [15]. В Черном бесприливном море единственным источником ВВ является ветер.

Интенсивные экспериментальные исследования динамики вод Черного моря выполнялись в 1970-х гг. Результаты показали, что в глубоководной части моря траектории инерционной составляющей течения имеют форму близкую к окружности с вращением по часовой стрелке, амплитуда инерционных колебаний убывает с глубиной, инерционные движения прослеживаются до 1500 м горизонта измерений [16]. Скорость проникновения инерционных движений в толщу вод составляет $\sim 2.3 \times 10^{-4}$ м/с (единственная оценка, полученная по данным восьмисуточной АБС в 1977 г. для Черного моря) [17].

Более поздние результаты дрейферного эксперимента 1999–2002 гг. показали, что в глубоководной части Черного моря энергия инерционных колебаний почти в 2 раза выше, чем в шельфовой зоне моря, и подтвердили возможность их захвата в области антициклонической завихренности [9].

Современные натурные исследования динамики вод выполняются, как правило, с использованием акустических доплеровских профилометров течений (ADCP). Данные о пространственной структуре течений в комплексе с данными STD-измерений позволяют получить более детальную картину исследуемых процессов. Результаты таких исследований на шельфе вблизи г. Геленджик, приведенные в работе [13], выявили разнообразие форм инерционных колебаний и их взаимосвязь с вариациями сдвигового фонового течения.

В настоящей статье изучаются характерные свойства инерционных колебаний в Черном море по результатам спектрального анализа данных измерителей течений, установленных на автономной буйковой станции, а также исследуются особенности вертикальной структуры около инерционных внутренних волн на основе непрерывных синхронных профилей горизонтальной скорости течения и потенциальной плотности.

2. Данные и приборы

В работе использованы архивные STD-данные, полученные в 15-м рейсе НИС «Трепанг», проходившем в северо-западной части Черного моря 19.10–08.11.1993 г. Схема расположения станций представлена на рис. 1 серыми кружками. Измерения выполнялись до глубины 500 м. В рейсе была установлена подповерхностная автономная буйковая станция (АБС), место постановки обозначено на рис. 1 звездочкой. Приборы МГИ-1301 закреплялись на кронштейнах на пяти горизонтах: 35, 50, 105, 225, 350 м. Измеряемые параметры: температура, скорость и направление течения (на горизонте 50 м вместо температуры измерялось давление). Начало записи 23:45 GMT 28.10.1993, продолжительность 2337 кадров, дискретность измерений 1 ч.

Современные данные получены в 91-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий», проходившем 16.11–02.12.2016 г., в центральном районе северной части Черного моря (рис. 1). В экспедиции STD-измерения производились зондом SBE9+. Профили температуры, солёности и условной плотности интерполировались на сетку 1 м по глубине. Для измерения течений использовался погружаемый ADCP (LADCP) [18] на

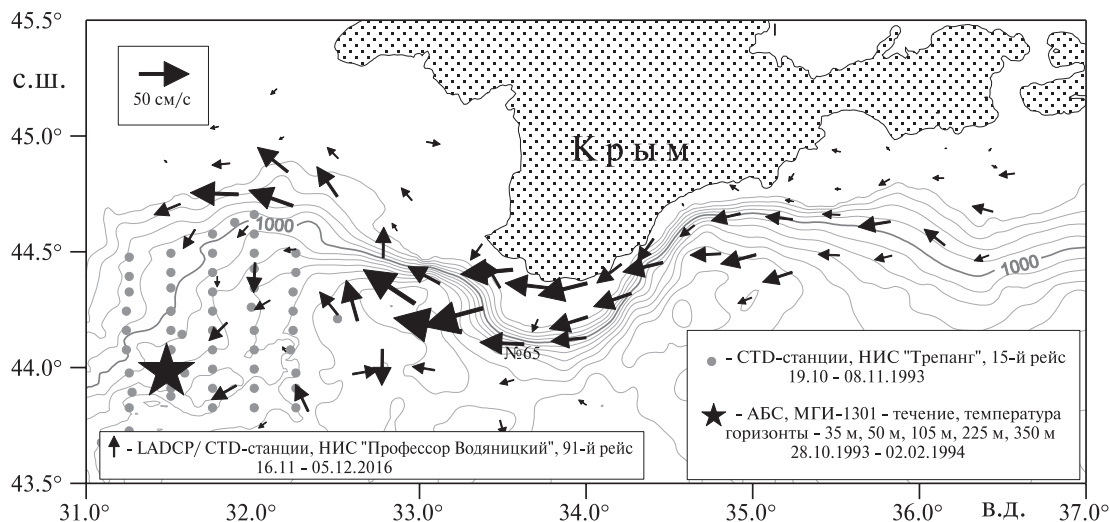


Рис. 1. Схема гидрологических станций. Серые кружки — гидрологические станции, выполненные в 15-м рейсе НИС «Трепанг» (19.10–08.11.1993). Звездочка — место постановки АБС в этом рейсе 28.10.1993. Стрелки — средняя по слою 10–30 м скорость течения по данным измерений на гидрологических станциях, выполненных в 91-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (16.11–05.12.2016).

Fig. 1. Map of hydrological stations. Gray circles are hydrological stations performed on the 15th cruise of the R/V «Trepang» (October 19–November 08, 1993). Asterisk is the ABS location in this cruise on October 28, 1993. Arrows are the average current velocity in the layer of 10–30 m, according to measurements at hydrological stations performed on the 91st cruise of the R/V «Professor Vodyanitsky» (November 16–December 05, 2016).

базе WHM300 производства RDI. Опция LADCP включена в режиме *HR/LR*, дискретность по глубине 4 м, количество сегментов глубины 27, дискретность по времени 1 с. Последовательность измерения скорости течения включала выдержку прибора у поверхности моря в течение 5 мин, дальнейшее его погружение до глубины 350 м, выдержку в течение 5 мин на этом горизонте и подъем на поверхность. Погружение/подъем прибора производился со скоростью ~ 0.5 м/с. Осредненные по слою 10–30 м векторы скорости течения представлены на рис. 1 стрелками.

3. Анализ данных АБС

На рис. 2, *a* приведены профили температуры и частоты плавучести, осредненные по всему массиву станций 15-го рейса НИС «Трепанг», горизонты измерений отмечены соответствующими маркерами. По отношению к особенностям вертикальной термохалинной структуры вод Черного моря, в начальной стадии постановки станции измерители течений находились в слое сезонного термоклина (35 м), холодном промежуточном слое (50 м), в окрестности максимума частоты плавучести в основном халоклине (105 м) и в нижней части моря (225 и 350 м). На рис. 2, *b* приведены рассчитанные по исходным данным первые инварианты пульсаций скорости течения ($J_{UU+VV}(\omega)$) на горизонтах 50, 105 и 225 м.

Вертикальные штриховые линии соответствуют локальной инерционной частоте $f = f_{In} = 10^{-4}$ рад/с ($T_{In} = 17.275$ ч), верхней (f_{HB}) и нижней (f_{LB}) границам диапазона инерционных колебаний. Границы инерционного диапазона выбирались на основании соотношения для эффективной инерционной частоты $f_{Eff} = f_{In} + \zeta/2$, где ζ — фоновая завихренность [3]. Нижняя граничная частота не может быть меньше фоновой циклонической завихренности $f_{In} - \frac{\zeta}{2} = \zeta \Rightarrow f_{In} - \frac{f_{LB}}{2} = f_{LB} \Rightarrow f_{LB} = \frac{2}{3} f_{In}$. Верхняя граничная частота выбиралась из условия, что фоновая антициклоническая завихренность не может быть больше локальной инерционной частоты $f_{HB} = f_{In} + \frac{\zeta}{2} = f_{In} + \frac{f_{In}}{2} = \frac{3}{2} f_{In}$.

В табл. 1 приведены основные результаты анализа спектральных характеристик. На всех горизонтах кинетическая энергия в инерционном диапазоне $EK_{NIW} = 0.5 \int_{f_{LB}}^{f_{HB}} J_{UU+VV}(\omega) d\omega$ составляет $\sim 70\%$ энергии

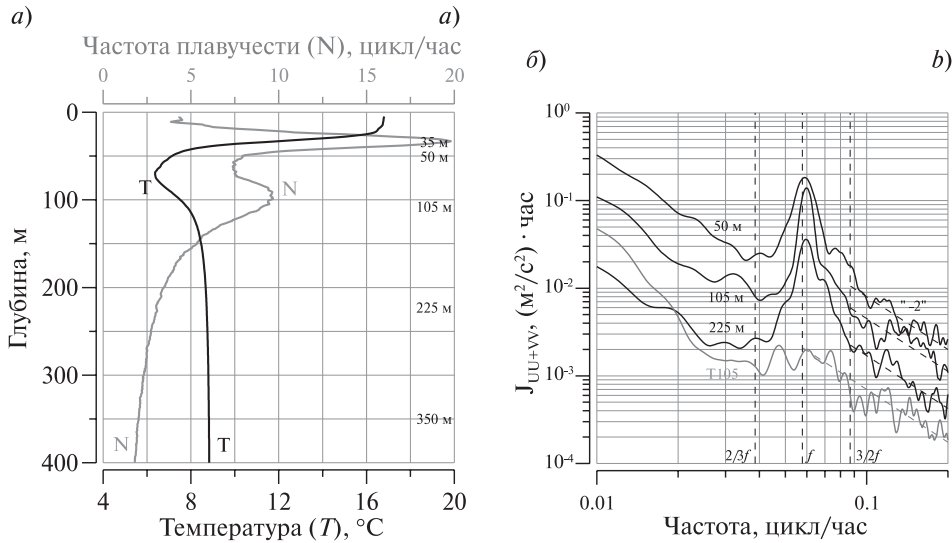


Рис. 2. Результаты измерений 1993–1994 гг. Осредненные по данным 15-го рейса НИС «Трепанг» профили температуры и частоты плавучести (а). Спектральная плотность (первые инварианты) пульсаций скорости течения на горизонтах 50, 105, 225 м (черные линии с соответствующими маркерами). Серая линия — оценка спектральной плотности удвоенной потенциальной энергии на горизонте 105 м (б).

Fig. 2. The results of the measurements in 1993–1994. Temperature and buoyancy frequency profiles averaged according to the data of the 15th cruise of the R/V «Trepang» (a). Spectral density (first invariants) of current velocity pulsations at the depths of 50, 105, 225 m (black lines with corresponding markers). The gray line is an estimate of the spectral density of the doubled potential energy at 105 m (b).

Таблица 1

Результаты спектрального анализа
Spectral analysis results

Н, м	ЕК _T , Дж/кг	ЕК _{IW} , Дж/кг	ЕК _{NIW} , Дж/кг	ЕК _{IW} /ЕК _T , %	ЕК _{NIW} /ЕК _T , %	ЕК _{NIW} /ЕК _{IW} , %	f _W /f _W	N, ч ⁻¹
35	0.01298	0.00184	0.00132	14	10.2	71.7	1.0624	20
50	0.01740	0.00198	0.00147	11.4	8.5	74.2	1.0417	7.5
105	0.00666	0.00097	0.000705	14.7	10.5	72,8	1.0526	9.5
225	0.00169	0.00036	0.000257	21.3	15.2	71.3	1.0638	3
350	0.00123	0.00034	0.000243	28	19	70.7	1.0651	1.7

всего диапазона внутренних волн $EK_{IW} = 0.5 \int_{f_{LB}}^{N(h)} J_{UU+VV}(\omega) d\omega$, где $N(z)_{z=h} = \sqrt{\frac{g}{\rho(z)} \frac{\partial \rho(z)}{\partial z}}$ — частота плавучести (табл. 1) на горизонте $z = h$, $\rho(z)$ — плотность, z — глубина. Средневзвешенная частота инерционного диапазона $f_W = \frac{\int_{f_{LB}}^{f_{HB}} \omega J_{UU+VV} d\omega}{\int_{f_{LB}}^{f_{HB}} J_{UU+VV} d\omega}$ составляет 1.042 на горизонте 50 м и 1.065 на горизонте 350 м.

В слое от 50 до 350 м осредненная полная кинетическая энергия $EK_T = \frac{0.5}{2337} \sum_{i=1}^{2337} (U_i^2 + V_i^2)$ уменьшается с глубиной в ~14 раз, в то время как энергия инерционных колебаний уменьшается в ~6 раз. Доля энергии внутренних волн в полной кинетической энергии возрастает от 10 % на горизонте 50 м до 30 % на 350 м.

Измерения, выполненные на горизонте 35 м, вызывают сомнения, поскольку показывают меньшую кинетическую энергию по отношению к ее значению на горизонте 50 м. Предположительно, это является следствием технических неполадок. Тем не менее, отношение кинетической энергии инерционного диапазона к полной кинетической энергии составляет 10 %, что хорошо согласуется с результатами дрейферных измерений [9].

Одним из важных показателей поля ВВ, который часто используется при анализе процессов вертикального перемешивания [19, 20], является соотношение кинетической ($E_{K_{IW}}$) и потенциальной ($E_{P_{IW}}$) энергий (R_w). Оценка спектральной плотности удвоенной потенциальной энергии ($J_{2EP}(w)$) на горизонте 105 м, рассчитанная по соотношению $J_{2EP}(w) = J_{TT}(w) \cdot \langle N^2 \rangle / \langle T_z \rangle^2$, где $J_{TT}(w)$ — спектральная плотность пульсаций температуры, $\langle N^2 \rangle$ — средний квадрат частоты плавучести (рис. 2, а), $\langle T_z \rangle$ — среднее значение производной температуры по глубине (рис. 2, а), представлена на рис. 2, б серой линией с маркером Т105. Соответствующие расчеты дают $R_w = E_{K_{IW}}/E_{P_{IW}} = 13.5$. Отметим, что для канонического спектра GM76 [21, 22] $R_w = 3$, однако во многих районах Мирового океана отношение энергий несколько выше [19, 20]. В соответствии с оценкой, приведенной в работе [23], в Черном море R_w в слое 250–450 м составляет ~ 12 , что хорошо согласуется с оценкой, полученной по данным АБС.

С целью получения численных оценок временных масштабов затухания инерционных колебаний на разных глубинах исходные ряды данных подвергались полосовой фильтрации с границами $f_{LB} \div f_{HB}$ и далее рассчитывались автокорреляционные функции. На рис. 3 приведены нормированные автокорреляционные функции пульсаций скорости течения в инерционной полосе частот на всех горизонтах измерений. На верхних горизонтах 35 и 50 м постоянная времени (τ_{Exp}) экспоненциального затухания огибающей автокорреляционной функции ($K_N^A(\tau) \propto e^{-\tau/\tau_{Exp}}$) составила ~ 55 ч, в основном пикноклине на 105 м — ~ 165 ч, в нижних слоях 225 и 350 м — ~ 70 ч. По времени затухания значительно выделяется слой основного пикноклина. Здесь увеличение рассматриваемого параметра может быть вызвано уменьшением вертикальной компоненты групповой скорости распространения почти инерционных ВВ.

В соответствии с работой [3] вертикальная компонента групповой скорости (C_{gv}) определяется соотношением

$$C_{gv} \approx -\frac{1}{k_v} \left[\frac{N^2 k_h^2}{f k_v^2} + \frac{k_h}{k_v} \left(\frac{\partial U_G}{\partial z} \frac{k_y}{k_h} - \frac{\partial V_G}{\partial z} \frac{k_x}{k_h} \right) \right], \quad (1)$$

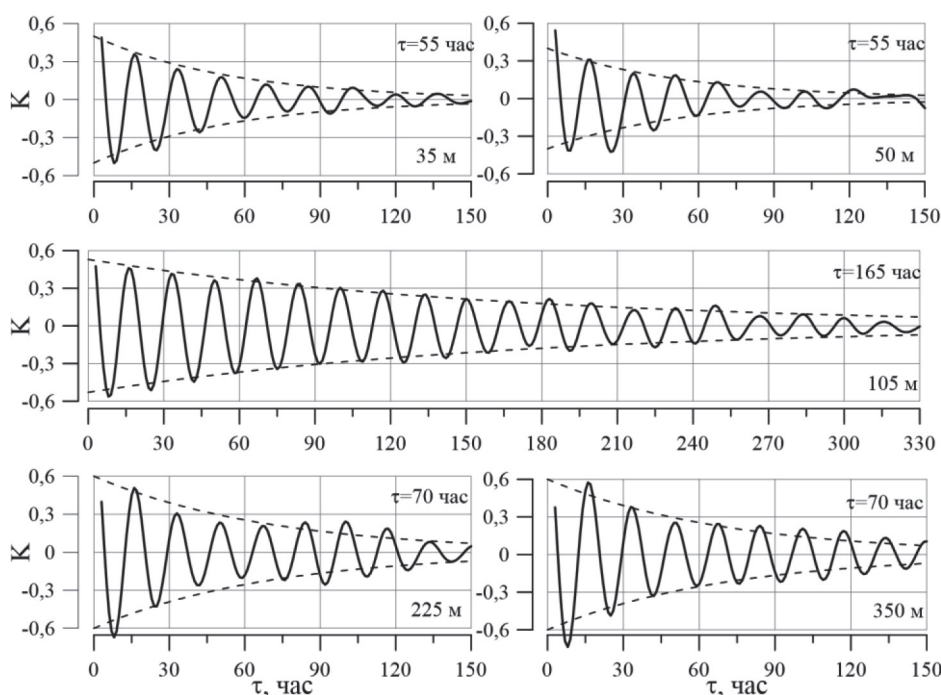


Рис. 3. Нормированные автокорреляционные функции (K) пульсаций скорости течения в диапазоне частот, близких к локальной инерционной.

Fig. 3. Normalized autocorrelation functions (K) of current velocity pulsations in the frequency range close to the local inertial frequency.

где k_h, k_v — волновые числа по горизонтали и вертикали, k_x, k_y — волновые числа по x и y , U_G, V_G — восточная и северная компоненты геострофической скорости. Для ВВ с частотой близкой к инерционной ($f_W = (1 + \delta)f$, $\delta \ll 1$, $f_W \ll N$) отношение квадратов горизонтального и вертикального волновых чисел может быть представлено в следующем упрощенном виде

$$\frac{k_h^2}{k_v^2} = \frac{f_W^2 - f^2}{N^2 - f_W^2} \approx 2\delta \frac{f^2}{N^2}. \quad (2)$$

Выражение в круглых скобках правой части (1) может быть упрощено если предположить доминирование западного направления потока и распространение ВВ с севера, в этих условиях соотношение принимает вид

$$C_{gv} = -\frac{f}{k_v} \left[2\delta - \frac{\sqrt{2\delta}}{N} \left| \frac{\partial U_G}{\partial z} \right| \right] \approx \left\{ \delta \approx 5 \cdot 10^{-2}, \text{ табл. 1} \right\} \approx -0.1 \frac{f}{k_v} \left(1 - \frac{3}{\sqrt{Ri_G}} \right). \quad (3)$$

На качественном уровне полученное выражение показывает, что вертикальная компонента групповой скорости прямо пропорциональна длине волны. Сомножитель в круглых скобках правой части имеет минимум в основном пикноклине, где число Ричардсона Ri_G в среднем составляет 30 [24] и значение сомножителя будет 0.45. На глубине 400 м число Ричардсона составляет в среднем 300 [24] и значение сомножителя возрастает до 0.83. Приведенные материалы могут служить подтверждением того, что время затухания автокорреляционных функций зависит от групповой скорости распространения почти инерционных ВВ, которая в свою очередь определяется их длиной, плотностной стратификацией и вертикальными сдвигами геострофической скорости течения.

В основном пикноклине Черного моря групповая скорость внутренней волны длиной 100 м, рассчитанная по соотношению (3), составит 7.2×10^{-5} м/с. Для условий моря Банда групповая скорость такой волны составила 5.8×10^{-5} м/с [8]. Несмотря на сделанные допущения при выводе соотношения (3) и значительное различие районов измерений единичное сопоставление показывает хорошую согласованность. Тем не менее, приведенные рассуждения справедливы в случае, если пакет волн на каждом горизонте имеет одинаковое число периодов. Детализация вертикальной структуры около инерционных ВВ приводится ниже.

4. Результаты анализа современных данных по течениям

В настоящее время LADCP является наиболее технологичным прибором для профилирования течений с борта дрейфующего судна до больших глубин и используется для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач современной океанологии [18, 25, 24]. В результате зондирования эти приборы обеспечивают измерение профилей северной и восточной компонент скорости течения с мелкомасштабным разрешением. Отдельно взятый профиль представляет собой почти мгновенное вертикальное сечение поля скорости течений в точке наблюдения, и отображает всю совокупность разномасштабных динамических процессов в их взаимодействии и развитии. Измеренные профили, как правило, отличаются значительной изрезанностью в отличие от плавно меняющихся с глубиной скоростей геострофических течений. Внутренние волны вносят существенный вклад в мелкомасштабную изменчивость течений, и в ряде случаев ВВ с частотой близкой к локальной инерционной проявляются в чистом виде [24]. В соответствии с работой [26] инерционные внутренние волны в северном полушарии характеризуются вращением вектора скорости течения с глубиной по часовой стрелке при распространении вниз, и вращением против часовой стрелки при распространении вверх. При этом на фиксированных горизонтах они будут проявляться как инерционные колебания с почти круговым вращением по часовой стрелке в обоих случаях.

В работе [27] приведены осредненные характеристики вертикального распределения кинетической энергии в деятельном слое моря по данным экспедиции 2016 г. На рис. 4, а приведены результаты измерения течений и условной плотности на станции № 65. Слой проявления инерционных ВВ выделен штриховыми линиями. Годограф скорости течения по глубине приведен на рис. 4, б и показывает вращение по часовой стрелке с периодом около 25 м. Более наглядно вращение проявляется в изменении с глубиной вертикального сдвига течений ($ShU(z) = \partial U(z)/\partial z$, $ShV(z) = \partial V(z)/\partial z$), годограф которого приведен на рис. 4, в.

На рис. 5, а приведены профили восточной (ShU) и северной (ShV) компонент сдвига скорости течения в слое проявления инерционной ВВ. На рис. 5, б приведены профили квадрата частоты плавучести и нормированной деформации (ξ), рассчитанной по соотношению

$$\xi(z) = \eta_z(z) \bar{N}(z) = \frac{N^2(z) - \bar{N}^2(z)}{\bar{N}^2(z)} \bar{N}(z), \quad (4)$$

где $\bar{N}^2(z) = a + bz$ — невозмущенный профиль квадрата частоты плавучести, представлен штриховой линией. Из рис. 5 можно видеть, что частота изменчивости нормированной деформации близка к удвоенной частоте доминирующей гармоники изменчивости сдвига, что, возможно, является следствием взаимодействия волны с плотностной стратификацией. Отношение кинетической энергии к потенциальной во внутренней волне, рассчитанное по соотношению [19]

$$\langle R_\omega \rangle = \int_{80}^{140} (ShU^2(z) + ShV^2(z)) dz / \int_{80}^{140} \xi^2(z) dz \quad (5)$$

составило ~ 40 . Смещение частоты (δ), рассчитанное из упрощенного соотношения

$$R_\omega = \frac{(\omega^2 + f^2)(N^2 - \omega^2)}{N^2(\omega^2 - f^2)} \Rightarrow \{N \gg \omega, \omega = (1 + \delta)f\} \Rightarrow \delta \approx \langle R_\omega \rangle^{-1}, \quad (6)$$

составило ~ 0.025 , что приблизительно соответствует положению максимума спектра пульсаций скорости течений (рис. 2, б). Длина волны по горизонтали, определенная из соотношения (2), составила ~ 40 км. По формальным признакам представленный материал подтверждает проявление инерционной внутренней волны с длиной $\lambda_v \cong 25$ м, распространяющейся вниз.

В целом по экспедиции, из 45 станций, выполненных в глубоководной части моря, проявление инерционных ВВ встречалось приблизительно в половине профилей. Наиболее часто они наблюдались в районе свала глубин. Длина волн составляла 20–50 м, средняя глубина ~ 120 м, среднее квадратическое отклонение

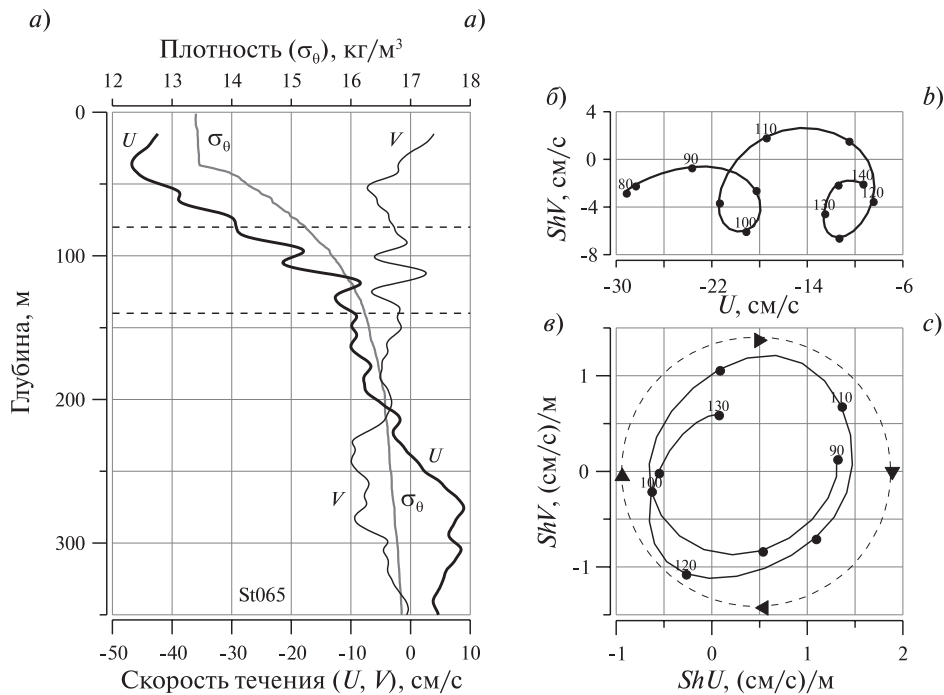


Рис. 4. Инерционные внутренние волны по данным измерений станции St065: *a* — профили плотности, северной (*V*) и восточной (*U*) компонент скорости течения, *b* — годограф скорости течения, *c* — годограф вертикального сдвига скорости течения. На рис. (*b*, *c*) числовые маркеры означают горизонт измерения в метрах.

Fig. 4. Inertial internal waves as measured at the St065 station: *a* — density profile, northern (*V*) and eastern (*U*) components of the current velocity, *b* — current velocity hodograph, *c* — current velocity vertical shift hodograph. In fig. (*b*, *c*) the numeric markers indicate the measurement depth in meters.

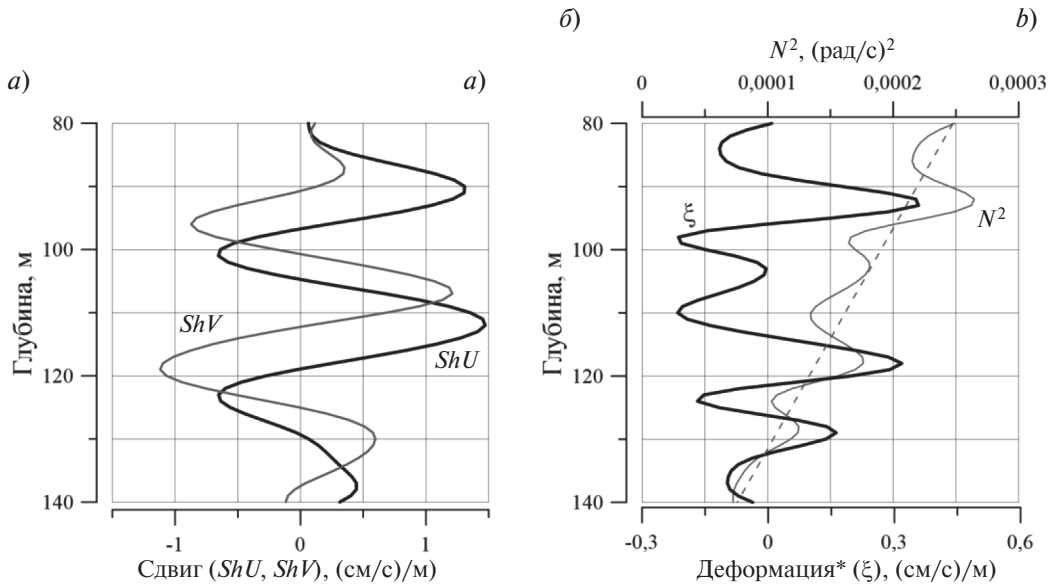


Рис. 5. Инерционные внутренние волны по данным измерений станции St065: *a* — профили северной (*ShV*) и восточной (*ShU*) компонент вертикального сдвига скорости течения, *б* — профили квадрата частоты плавучести (N^2) и нормированной деформации (ξ).

Fig. 5. Inertial internal waves as measured at the St065 station: *a* — profiles of the northern (*ShV*) and eastern (*ShU*) components of the vertical shift of the current velocity, *b* — profiles of the squared buoyancy frequency (N^2) and normalized deformation (ξ).

37 м. Годографы с вращением по часовой стрелке наблюдались в подавляющем большинстве профилей. Средняя ширина слоя проявления инерционных ВВ составила $\sim 1.5\lambda_p$. Более обеспеченная статистика требует большего количества измерений и может быть предметом дальнейшей работы.

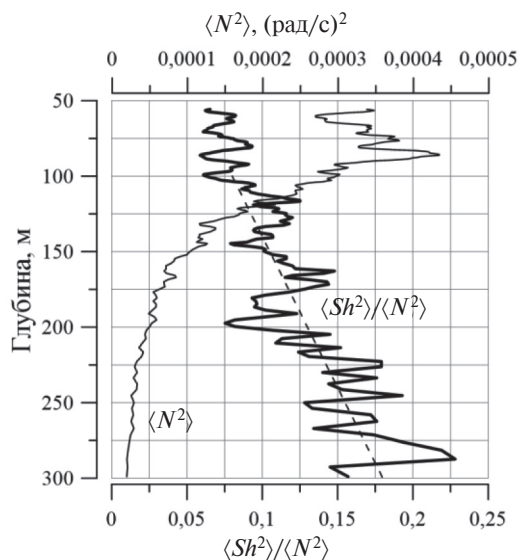


Рис. 6. Изопикнически осредненные профили квадрата частоты плавучести ($\langle N^2 \rangle$) и нормированного квадрата вертикального сдвига скорости течения ($\langle Sh^2 \rangle / \langle N^2 \rangle$).

Fig. 6. Isopicnical averaged profiles of the squared buoyancy frequency ($\langle N^2 \rangle$) and normalized squared vertical shear of current velocity ($\langle Sh^2 \rangle / \langle N^2 \rangle$).

В Черном море, инерционные ВВ, как и во многих районах Мирового океана [3], скорее всего, являются основным элементом динамики, определяющим картину вертикальных сдвигов скорости течения и, в конечном счете, отвечающим за интенсивность процессов вертикального турбулентного перемешивания во всей толще вод. На рис. 6 приведен изопикнически осредненный по ансамблю глубоководных станций (рис. 1) профиль отношения среднего квадрата сдвига к среднему квадрату частоты плавучести ($Ri_*^{-1} = \langle Sh^2 \rangle / \langle N^2 \rangle$). Минимум отношения наблюдается в слое основного пикноклина. Ниже в слое от 100 до 300 м значение параметра увеличивается более чем в 2 раза. Возрастание Ri_*^{-1} с глубиной, на качественном уровне, может рассматриваться как усиление вертикального перемешивания в нижних слоях моря, и косвенно указывает на отличие спектра ВВ от канонического вида GM76. Количественная оценка коэффициента турбулентной вертикальной диффузии выходит за рамки данной статьи.

5. Заключение

В данной статье внутренние волны с частотой, близкой к инерционной, рассматривались на основе двух видов натуральных данных. Одни из них, временные ряды скорости течения продолжительностью ~ 100 сут, получены на пяти горизонтах

в точке постановки АБС. Другие данные, представляющие непрерывные профили северной и восточной компонент скорости течения, собраны с использованием LADCP в различных точках центрального района северной части Черного моря.

По данным АБС инерционные внутренние волны воспринимаются как инерционные колебания с вращением вектора скорости течения от времени по часовой стрелке. На всех горизонтах в полосе частот $\frac{2}{3}f \div \frac{3}{2}f$ сконцентрировано не менее 70 % кинетической энергии внутриволнового диапазона. С глубиной доля внутренних волн в общей кинетической энергии возрастает от ~10 % на горизонте 50 м до ~30 % на горизонте 350 м. Характерным для инерционных колебаний является быстрое уменьшение их энергии с глубиной в окрестности максимума частоты плавучести в основном пикноклине. Это согласуется с ранее выдвинутым предположением об экранирующем действии основного пикноклина, ограничивающего проникновение инерционных колебаний в нижние слои моря. Относительное увеличение времени затухания инерционных колебаний (обострение инерционного пика) в окрестности максимума частоты плавучести может быть следствием уменьшения вертикальной групповой скорости около инерционных внутренних волн из-за их взаимодействия с геострофическими потоками. Косвенная оценка среднего по спектру в диапазоне внутренних волн отношения кинетической и потенциальной энергий составила 13,5, что хорошо согласуется с другими измерениями в разных районах Мирового океана.

В непрерывных профилях около инерционные внутренние волны проявляются во вращении вектора (сдвига) скорости течения с глубиной. В подавляющем большинстве случаев наблюдается вращение по часовой стрелке. Это означает, что направление распространения волн в толщу вод является доминирующим и подтверждает их ветровое происхождение как основное. Зарегистрированные характерные длины волн по вертикали составили 25–50 м, однако с учетом передаточной функции пространственного осреднения присущей LADCP, их характерный масштаб может быть меньше. В ряде профилей скорости течения около инерционные внутренние волны проявляются в чистом виде. В приведенном в статье примере, отношение кинетической и потенциальной энергий достигает 40 для отдельной волны с частотой на 2,5 % превышающей инерционную.

Совместный анализ архивных и современных данных по течениям позволил наглядно отобразить физическую природу инерционных колебаний и детализировать их свойства в северной части Черного моря. Полученные результаты имеют региональное значение и относятся к району северной части циклонической крупномасштабной циркуляции Черного моря. Тем не менее, результаты, представленные в статье, могут быть полезны как для формирования задач дальнейших исследований характеристик инерционных колебаний, так и для планирования экспериментальных работ с целью их целенаправленного изучения.

6. Благодарности

Выражаем глубокую признательность участникам экспедиций за высокое качество выполненных измерений.

7. Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0555–2021–0003 «Оперативная океанология», № 0555–2021–0005 «Прибрежные исследования».

Литература

1. *Munk W.* Internal waves and small-scale processes // *Evolution of Physical Oceanography* / Eds. B.A. Warren and C. Wunsch. The MIT Press, 1981. P. 264–291.
2. *Pollard R.T., Millard R.C.* Comparison between observed and simulated wind-generated inertial oscillations // *Deep Sea Res.* 1970. V. 17. P. 153–175.
3. *Kunze E.* Near-Inertial Wave Propagation in Geostrophic Shear // *J. Phys. Oceanogr.* 1985. V. 15. P. 544–565.
4. *Фомин Л.М.* Об инерционных колебаниях в горизонтально неоднородном поле скорости течений в океане // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1978. Т. 9, № 1. С. 147–157.
5. *Gerkema T., Shrira V.I.* Near-inertial waves on the “nontraditional” b plane // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, C01003. doi: 10.1029/2004JC002519
6. *Калашник М.В.* Распространение и захват инерционно-гравитационных волн в сдвиговых течениях (лучевая теория) // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2013. Т. 49, № 2. С. 240–252.

7. Сабинин К.Д., Коротаев Г.К. Инерционные колебания в присутствии сдвигового течения в океане // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 3. С. 399–405.
8. Alford M.H., Gregg M.C. Near-inertial mixing: Modulation of shear, strain and microstructure at low latitude // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, N C8. P. 16947–16968. doi: 10.1029/2000JC000370
9. Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В., Еремеев В.Н., Кременецкий В.В., Мотыжев С.В., Поярко С.Г., Пулейн П.-М., Станичный С.В., Соловьев Д.М. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейфтерным данным // Океанология. 2004. Т. 44, № 1. С. 34–48.
10. Van Haren H. Spatial variability of deep-ocean motions above an abyssal plain // J. Geophys. Res. 2004. V. 109, C12014. doi: 10.1029/2004JC002558
11. Sherman R.K. Observations of near-inertial current variability on the New England shelf // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, C02012. doi: 10.1029/2004JC002341
12. Лаврова О.Ю., Сабинин К.Д. Проявление инерционных колебаний на спутниковых изображениях морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 4. С. 60–73.
13. Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В. Характеристики инерционных колебаний по данным экспериментальных измерений течений на российском шельфе Черного моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 1. С. 135–142.
14. Кловиткин А.А., Островский А.Г., Лисицын А.П., Коновалов С.К. Энергетический спектр скорости течения в глубокой части Чёрного моря // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488, № 5. С. 550–554. doi: 10.31857/S0869–56524885550–554
15. Munk W., Wunsch C. Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing // Deep Sea Res. I. 1998. 45. P. 1977–2010.
16. Богуславский С.Г., Иванов В.А., Янковский А.Е. Особенности инерционных течений Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 1996. № 3. С. 58–68.
17. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А., Косарев А.Н., Тужилкин В.С. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 240 с.
18. Firing E., Gordon R. Deep ocean acoustic Doppler current profiling // Proc. IEEE4th Working Conf. on Current Measurements. MD, IEEE, 1990. P. 192–201.
19. Polzin K.L., Toole J.M., Smith R.W. Finescale parameterizations of turbulent dissipation // Ibid. 1995. V. 25. P. 306–328.
20. Naveira Garabato A.C., Oliver K.I.C., Watson A.J. et al. Turbulent diapycnal mixing in the Nordic Seas // J. Geophys. Res. 2004. 109, C12010. 9 p.
21. Garrett C.J.R., Munk W.H. Space-time scales of internal waves: A progress report // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 291–297. doi: 10.1029/JC080i003p00291
22. Cairns J.L., Williams G.O. Internal Waves Observations From a Midwater Float, 2 // J. Geophys. Res. 1976. V. 81, N 12. P. 1943–1950.
23. Морозов А.Н., Лемешко Е.М. Оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по данным STD/LADCP-измерений в северо-западной части Черного моря в мае 2004 года // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 1. С. 58–67.
24. 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. N 1. P. 25–40.
25. Амбросимов А.К. Пространственно-временная изменчивость характеристик течения в глубоководной части Среднего Каспия // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 60–77.
26. Lemarié D.K., Sanford T.B. Vertical Energy Propagation of Inertial Waves: A Vector Spectral Analysis of Velocity Profiles // J. Geophys. Res. 1975. V. 80, N 15. P. 1975–1978.
27. Морозов А.Н., Маньковская Е.В. Сезонная изменчивость структуры течений в северной части Черного моря по данным натурных наблюдений 2016 г. // Фундам. прикл. гидрофиз. 2019. Т. 12, № 1. С. 15–20. doi: 10.7868/S2073667319010027

References

1. Munk W. Internal waves and small-scale processes. *Evolution of Physical Oceanography*. Eds. B.A. Warren and C. Wunsch. The MIT Press, 1981, 264–291.
2. Pollard R.T., Millard R.C. Comparison between observed and simulated wind-generated inertial oscillations. *Deep Sea Res.* 1970, 17, 813–821. doi: 10.1016/0011–7471(70)90043–4
3. Kunze E. Near-Inertial Wave Propagation in Geostrophic Shear. *J. Phys. Oceanogr.* 1985, 15, 544–565. doi: 10.1175/1520–0485(1985)015<0544: NIWPIG>2.0.CO;2

4. Fomin L.M. On inertial oscillations in a horizontally inhomogeneous field flow velocity in the ocean. *Izv. AN SSSR, Fizika Atmosfery i Okeana*. 1978, 9, 1, 147–157 (in Russian).
5. Gerkema T., Shrira V.I. Near-inertial waves on the “nontraditional” b plane. *J. Geophys. Res.* 2005, 110, C01003, 10 p. doi: 10.1029/2004JC002519
6. Kalashnik M.V. Propagation and trapping of inertial gravity waves in shear flows (ray theory). *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2013, 49, 2, 217–228. doi: 10.1134/S0001433813020102
7. Sabinin K.D., Korotaev G.K. Inertial oscillations over the background of shear currents in the ocean. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017, 53, 3, 352–358. doi: 10.1134/S0001433817030100
8. Alford M.H., Gregg M.C. Near-inertial mixing: Modulation of shear, strain and microstructure at low latitude. *J. Geophys. Res.* 2001, 106, C8, 16947–16968. doi: 10.1029/2000JC000370
9. Zhurbas V.M., Zatselin A.G., Grigor'eva Yu.V., Poyarkov S.G., Eremeev V.N., Kremenetsky V.V., Motyzhev S.V., Stanichny S.V., Soloviev D.M., Poulain P.-M. Water circulation and characteristics of currents of different scales in the upper layer of the Black sea from drifter data. *Oceanology*. 2004, 44, 1, 30–43.
10. Van Haren H. Spatial variability of deep-ocean motions above an abyssal plain. *J. Geophys. Res.* 2004, 109, C12014, 12 p. doi: 10.1029/2004JC002558
11. Sherman R.K. Observations of near-inertial current variability on the New England shelf. *J. Geophys. Res.* 2005, 110, C02012, 16 p. doi: 10.1029/2004JC002341
12. Lavrova O. Yu., Sabinin K.D. Manifestations of inertial oscillations in satellite images of the sea surface. *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2016, 13, 4, 93–101 (in Russian). doi: 10.21046/2070–7401–2016–13–4–60–73
13. Bondur V.G., Sabinin K.D., Grebenyuk Y.V. Characteristics of inertial oscillations according to the experimental measurements of currents on the russian shelf of the Black Sea. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017, 53, 1, 120–126. doi: 10.1134/S0001433816050030
14. Klyuvitkin A.A., Ostrovskii A.G., Lisitzin A.P., Kononov S.K. The energy spectrum of the current velocity in deep layers of the Black Sea. *Doklady Earth Sciences*. 2019, 488, 2, 1222–1226. doi: 10.1134/S1028334X1910012X
15. Munk W., Wunsch C. Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing. *Deep Sea Res. I*. 1998, 45, 1977–2010.
16. Boguslavsky S.G., Ivanov V.A., Yankovsky A.E. Features of inertial currents of the Black Sea. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 1996, 3, 58–68 (in Russian).
17. Blatov A.S., Bulgakov N.P., Ivanov V.A., Kosarev A.N., Tuzhilkin V.S. Variability of Hydrophysical fields of the Black Sea. *Leningrad, Meteozdat*, 1984. 240 p. (in Russian).
18. Firing E., Gordon R. Deep ocean acoustic Doppler current profiling. *Proc. IEEE4th Working Conf. on Current Measurements. MD, IEEE*, 1990, 192–201.
19. Polzin K.L., Toole J.M., Smith R.W. Finescale parameterizations of turbulent dissipation. *Ibid.* 1995, 25, 306–328.
20. Naveira Garabato A.C., Oliver K.I.C., Watson A.J. et al. Turbulent diapycnal mixing in the Nordic seas. *J. Geophys. Res.* 2004, 109, C12010. 9 p. doi: 10.1029/2004JC002411
21. Garrett C.J.R., Munk W.H. Space-time scales of internal waves: A progress report. *J. Geophys. Res.* 1975, 80, 291–297. doi: 10.1029/JC080i003p00291
22. Cairns J.L., Williams G.O. Internal waves observations from a midwater float, 2. *J. Geophys. Res.* 1976, 81, 12, 1943–1950.
23. Morozov A.N., Lemeshko E.M. Estimation of the vertical turbulent diffusion coefficient based on CTD/ADCP measurements in the North-Western part of the Black Sea in May 2004. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2014, 1, 58–67 (in Russian).
24. 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, 1, 25–40. doi: 10.22449/1573–160X-2017–1–25–40
25. Ambrosimov A.K. Spatiotemporal variability of the flow in the deep part of the central Caspian Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2016, 41, 1, 43–56. doi: 10.3103/S1068373916010064
26. Leman D.K., Sanford T.B. Vertical energy propagation of inertial waves: a vector spectral analysis of velocity profiles. *J. Geophys. Res.* 1975, 80, 15, 1975–1978.
27. Morozov A.N., Mankovskaya E.V. Seasonal variability of currents structure in the Black Sea Northern part from field measurements in 2016. *Fundam. Prikl. Gidrofiz.* 2019, 12, 1, 15–20 (in Russian). doi: 10.7868/S2073667319010027