

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

Научная статья

УДК 551.465

EDN: POFJIN

Вертикальное перемешивание в основном пикноклине Черного моря в летний сезон

А. Н. Морозов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ anmorozov@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 14.10.2024; одобрена после рецензирования 29.10.2024;
принята к публикации 13.03.2025.

Аннотация

Цель. Оценить параметры вертикального турбулентного перемешивания в основном пикноклине Черного моря по данным о скорости течения и плотности, измеренных стандартными гидрологическими приборами – цель настоящего исследования.

Методы и результаты. В работе использованы данные, собранные в шести летних экспедициях НИС «Профессор Водяницкий» 2016–2021 гг. в центральном секторе северной части моря. Профили температуры, солёности и скорости течения измерялись CTD/LADCP-зондами. Коэффициент вертикальной турбулентной диффузии рассчитывался с применением параметризации G03. Приведены прикладные соотношения. В качестве исходных данных использовались значения необходимых параметров на изопикнической поверхности со значением условной плотности 15 кг/м^3 . Их профильтрованные зависимости от ее глубины подставлялись в расчетные соотношения. Выявлено, что хорошо выраженный максимум удельной кинетической энергии в среднем наблюдается при глубине изопикны 77 м. Значение отношения сдвиг/деформация и значение для канонического спектра внутренних волн близки. Среднее значение измеренного сдвига составило около трети значения для канонического спектра внутренних волн. Среднее значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии составило $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Его значение в центре моря сопоставимо с коэффициентом молекулярной диффузии тепла. Максимум при глубине изопикны 90 м достигает $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, смещен вправо относительно ОЧТ на расстояние по горизонтали около 26 км. Среднее значение скорости диссипации турбулентной кинетической энергии составило $2 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/кг}$.

Выводы. Значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии, рассчитанное на основе данных, собранных с разрешением по глубине около 10 м, хорошо согласуется с оценками, полученными по данным микроструктурных зондов. Однако результаты работы следует считать предварительными, и для получения более убедительного подтверждения их правильности целесообразно проведение синхронных измерений микроструктурными зондами и стандартными гидрологическими приборами.

Ключевые слова: Черное море, основной пикноклин, вертикальное турбулентное перемешивание, Основное Черноморское течение, сдвиг скорости течения, деформация

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0012 «Оперативная океанология».

Для цитирования: Морозов А. Н. Вертикальное перемешивание в основном пикноклине Черного моря в летний сезон // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 3. С. 251–263. EDN POFJIN.

© Морозов А.Н., 2025

Vertical Mixing in the Main Pycnocline of the Black Sea in Summer

A. N. Morozov

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ anmorozov@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The study is aimed at assessing the parameters of vertical turbulent mixing in the main pycnocline of the Black Sea based on the data on current velocity and density measured by standard hydrological instruments.

Methods and Results. The data collected during six summer cruises of R/V “Professor Vodyanitsky” in the central sector of the northern sea area in 2016–2021 were used in the research. Temperature, salinity and current velocity profiles were measured by the CTD/LADCP probes. The vertical turbulent diffusion coefficient was calculated with the G03 parameterization. The applied relations are given. The values of required parameters on the isopycnic surface with the conditional density value 15 kg/m^3 are used as the initial data. Their filtered dependencies on its depth are substituted into the calculated relations. It is found that a well-pronounced maximum of specific kinetic energy is observed on average when the isopycnic depth is 77 m. The values of the shear/strain ratio and the canonical internal wave spectrum are close. The average value of measured shear constitutes about one third of the value of canonical internal wave spectrum. The average value of vertical turbulent diffusion coefficient is $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Its value in the central sea area is comparable to the heat molecular diffusion coefficient. At the isopycnic depth 90 m, the maximum value reaching $1.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ is shifted to the right relatively the Rim Current at a horizontal distance of about 26 km. The average value of the turbulent kinetic energy dissipation rate is $2 \cdot 10^{-9} \text{ W/kg}$.

Conclusions. The value of the vertical turbulent diffusion coefficient calculated based on the data collected with a depth resolution of about 10 m agrees well with the estimates obtained from the data of microstructural probes. However, the results of the study should be considered preliminary; in order to obtain a more convincing confirmation of their correctness, it is advisable to conduct synchronous measurements using the microstructural probes and standard hydrological instruments.

Keywords: Black Sea, main pycnocline, vertical turbulent mixing, Rim Current, current velocity shear, strain

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of theme of state assignment of FSBIS FRC MHI FNNN-2024-0012 “Operational Oceanology”.

For citation: Morozov, A.N., 2025. Vertical Mixing in the Main Pycnocline of the Black Sea in Summer. *Physical Oceanography*, 32(3), pp. 271-282.

Введение

Вертикальное турбулентное перемешивание является основным механизмом диапикнического обмена теплом, солью и иными субстанциями в стратифицированной морской среде [1]. Оно играет важную роль в трансформации водных масс, поддержании существующей стратификации и модуляции крупномасштабной циркуляции [2]. В настоящее время численное моделирование представляется одним из важнейших инструментов исследования морской среды. Однако разрешение современных моделей по глубине не позволяет напрямую учитывать вертикальное перемешивание и нуждается в его параметризации [3]. Необходимость более глубокого понимания влияния вертикаль-

ного перемешивания на протекание биогеохимических процессов и совершенствование его параметризации в численных моделях предопределяет актуальность его натурных исследований.

Для экспериментальной оценки параметров вертикального перемешивания необходимо проводить измерения с разрешением по глубине на сантиметровых масштабах [4]. Однако в настоящее время применение микроструктурных зондов, обеспечивающих такое разрешение, ограничивается дороговизной аппаратуры и значительными временными затратами при проведении измерений [5]. В глубоководной части Черного моря измерения микроструктурными зондами проводились трижды [1, 6, 7]. Измерения, выполненные в марте 2003 г. в центре западного круговорота [6], показали, что в оксиклине значения коэффициента вертикальной турбулентной диффузии (K_v) составили всего $(1-4) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. На примере одного профиля, полученного в июле 2005 г. в северо-восточной части моря [1], значение K_v в основном пикноклине составило около $4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Измерения, выполненные в августе 2022 г. в центральном секторе северной части моря, показали наличие минимума K_v в основном пикноклине [7]. К сожалению, форма представления результатов не дает возможности определить его значение.

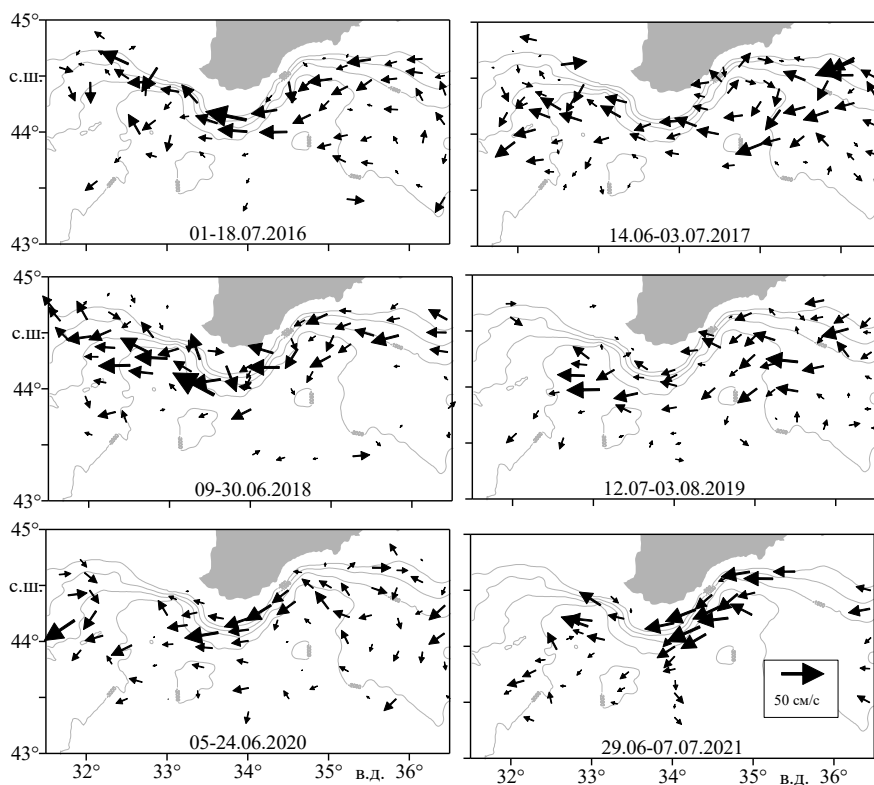
Альтернативное определение параметров вертикального перемешивания основывается на использовании профилей плотности и скорости течения, измеренных с разрешением около 10 метров по глубине. Данные такого рода являются для Черного моря массовыми. В частности, это данные зонда «Аквалог» [8], установленного на изобате около 300 м вблизи города Геленджик. На их основе была исследована временная изменчивость вертикальной структуры K_v с применением параметризации, основанной на значениях числа Ричардсона [9, 10]. Измерение профилей скорости течения погружаемым акустическим доплеровским профилометром течений с борта дрейфующего судна позволило получить осредненную вертикальную структуру K_v в области Севастопольского антициклона [11] и северной части моря [12].

В настоящей статье на основе данных, собранных в летних экспедициях Морского гидрофизического института [13], предпринята попытка исследовать горизонтальное распределение параметров вертикального турбулентного перемешивания в основном пикноклине. На текущий момент этот вопрос является неизученным, но потребность в его решении, возможно, существует, в частности для лучшего понимания влияния крупномасштабной динамики на процессы вертикального перемешивания. Для оценки параметров вертикального турбулентного перемешивания использовалась параметризация G03 [14]. Исторически она развивалась с теоретической работы [15] с последующим практическим использованием ее результатов [16, 17], получила развитие в работе [18] и в конечной редакции представлена в работе [19]. В настоящее время широкое применение параметризации G03 обусловлено хорошей сопоставимостью рассчитанных параметров вертикального турбулентного перемешивания с оценками по данным микроструктурных измерений [4, 5, 20, 21, 22].

Цель настоящей работы – оценка параметров вертикального турбулентного перемешивания в основном пикноклине Черного моря по данным о скорости течения и плотности, измеренных стандартными гидрологическими приборами.

Приборы и данные

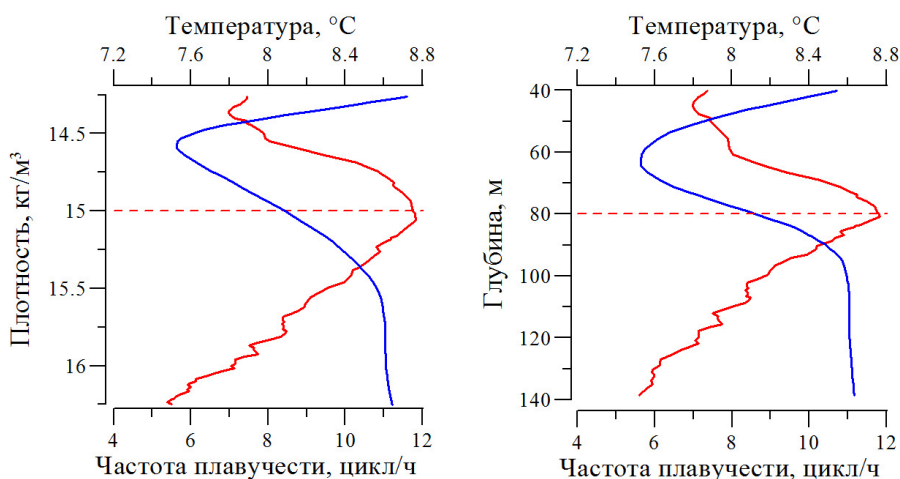
В работе использованы профили температуры, солёности и скорости течения, полученные в шести летних экспедициях НИС «Профессор Водяницкий» в северной части Черного моря (31,5–36,5° в. д., 43,5–45° с. ш.): 1–18 июля 2016 г.; 14 июня – 3 июля 2017 г.; 9–30 июня 2018 г.; 12 июля – 3 августа 2019 г.; 5–24 июня 2020 г.; 29 июня – 7 июля 2021 г. К сожалению, покрытие района измерений станциями не было равномерным и изменялось от экспедиции к экспедиции (рис. 1). Среднее расстояние между соседними станциями составило ~ 20 км. Профили температуры и солёности до 2019 г. включительно измерялись зондом *SBE911+* и зондом *Idronaut Ocean Seven 320 PlusM* после 2019 г. Измерение профилей горизонтальных компонент вектора скорости течения выполнялось погружаемым акустическим доплеровским профилометром течений (*LADCP*) на основе *WHM300*. Установочные параметры прибора: размер сегмента глубины – 4 м, широкополосный метод, скорость погружения/подъёма ~ 0,5 м/с.



Р и с. 1. Скорость течения, измеренная на глубине 20 м, в шести летних экспедициях НИС «Профессор Водяницкий». Начало стрелки соответствует положению станции (всего 353 станции)

F i g. 1. Current velocity measured at the 20 m depth during six summer cruises of R/V “Professor Vodyanitsky”. The arrow beginning corresponds to the station position (353 stations in total)

Крупномасштабная циклоническая циркуляция на качественном уровне проявляется в доминировании западного направления скорости течения (рис. 1), наибольшие значения которой отмечаются над континентальным склоном вблизи южного берега Крымского п-ова. Основное Черноморское течение (ОЧТ) не выражено: с одной стороны, в летнее время оно ослабевает, с другой – ширина его струи составляет приблизительно 30 км и при расстоянии между станциями около 20 км оно может не всегда проявляться в измерениях. Вихревые образования, по данным измерения скорости течения, обнаружены в двух из шести экспедиций. В экспедиции 2017 г. наблюдался Крымский антициклон с центром в точке (34,78° в. д., 44,35° с. ш.) и диаметром около 60 км. Фрагмент Севастопольского антициклона с центром в точке (31,6° в. д., 44,34° с. ш.) и тем же диаметром наблюдался в экспедиции 2020 г.



Р и с. 2. Изопикнически осредненные зависимости температуры воды (синие линии) и частоты плавучести (красные линии) от плотности (слева) и глубины (справа) в экспедиции 2017 г.

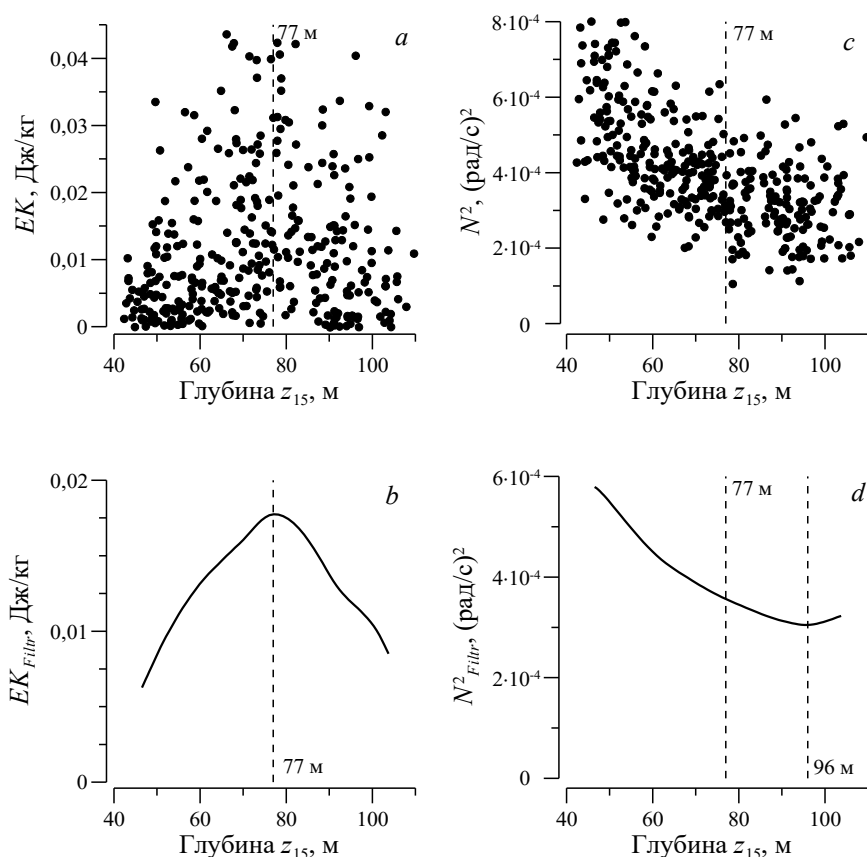
F i g. 2. Along-isopycnic averaged dependencies of water temperature (blue lines) and buoyancy frequency (red lines) upon density (left) and depth (right) during the cruise in 2017

Вследствие циклонического характера крупномасштабной циркуляции в Черном море изопикнические поверхности имеют куполообразную форму. Их глубина увеличивается в направлении от центра моря к континентальному склону. Перепад глубины изопикнической поверхности между центром моря и континентальным склоном может достигать 70 м и более. Поэтому для получения корректного представления об особенностях среднего вертикального распределения гидрологических и иных параметров морской среды следует проводить изопикническое осреднение. В рамках настоящей работы внимание акцентируется на определении параметров вертикального турбулентного перемешивания на отдельной изопикнической поверхности. Для выбора значения условной плотности (σ_t) было проведено изопикническое осреднение профилей частоты плавучести для набора станций каждой из экспедиций. Изопикнически осредненные зависимости частоты плавучести от плотности для экспедиции 2017 г. (рис. 2, слева) показывают наличие ярко выраженного максимума при $\sigma_t = 15$ кг/м³. Данные других экспедиций подтверждают наличие

этого максимума [13]. Именно изопикна со значением условной плотности 15 кг/м^3 была выбрана для оценки параметров диапикнического перемешивания. Интуитивно ожидается, что усиление плотностной стратификации на рассматриваемой изопикнической поверхности должно привести к ослаблению вертикального турбулентного перемешивания. Приведенные на рис. 2 изопикнически осредненные профили температуры показывают относительное расположение холодного промежуточного слоя, наиболее известной черты вертикальной термической структуры Черного моря [13].

Результаты и обсуждение

Значения гидрологических параметров на изопикне $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ для всех 353 станций рассчитывались с применением линейной интерполяции. Для низкочастотной фильтрации исходных данных использовался косинусный фильтр с шириной окна 30 м. Отношение приращения расстояния по горизонтали к приращению глубины изопикнической поверхности $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ составило около 2 км на 1 м [23]. Далее обсуждаются зависимости параметров на изопикнической поверхности $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ от ее глубины (z_{15}).



Р и с. 3. Зависимости кинетической энергии и квадрата частоты плавучести (a, c – исходные данные; b, d – после фильтрации) на изопикнической поверхности $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ от глубины

F i g. 3. Dependencies of kinetic energy and square of buoyancy frequency (a, c – initial data; b, d – after filtration) on isopycnic surface $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ upon depth

На рис. 3, *a* приведена зависимость измеренных значений удельной кинетической энергии (EK) от глубины изопикны со значением условной плотности $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$. Большой разброс исходных данных (рис. 3, *a*) может определяться отчасти временной изменчивостью поля скорости течения, поскольку измерения выполнялись в разные годы, а также внутренними волнами с частотой, близкой к локальной инерционной, так как продолжительность каждой экспедиции составляла не менее 30 инерционных периодов. После фильтрации (рис. 3, *b*) зависимость $EK_{Filtr}(z_{15})$ показывает наличие хорошо выраженного максимума при $z_{15} = 77 \text{ м}$. Значение модуля скорости течения в максимуме составляет 19 см/с . Максимум скорости течения определяется ОЧТ, центр которого в среднем наблюдается при $z_{15} = 77 \text{ м}$ (штриховая прямая с маркером 77 м на рис. 3–6).

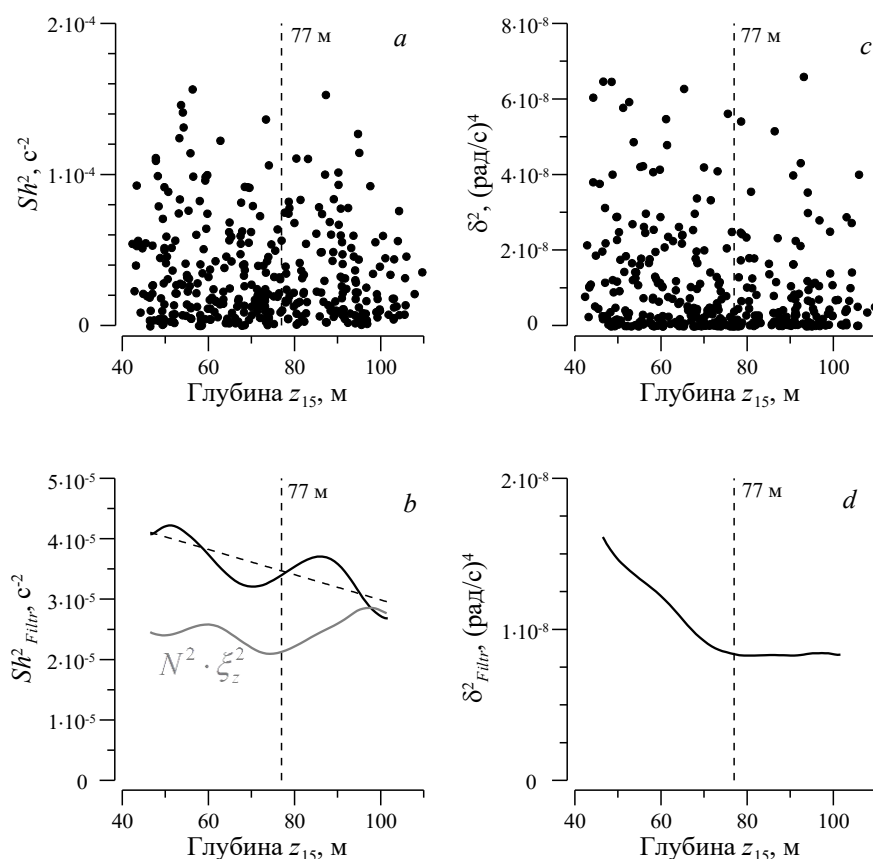
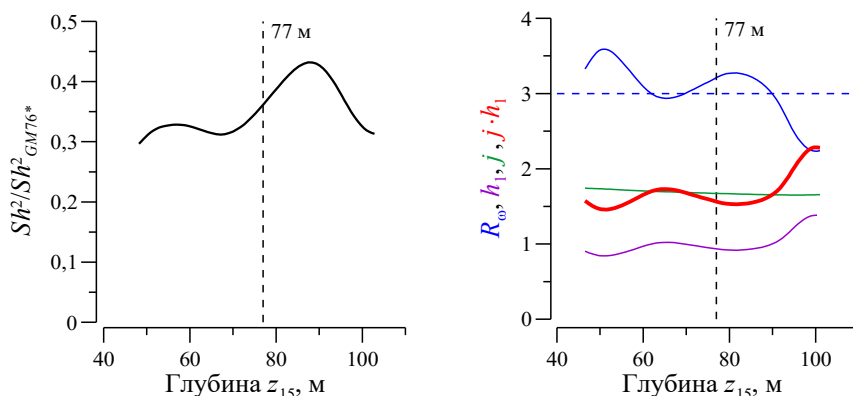
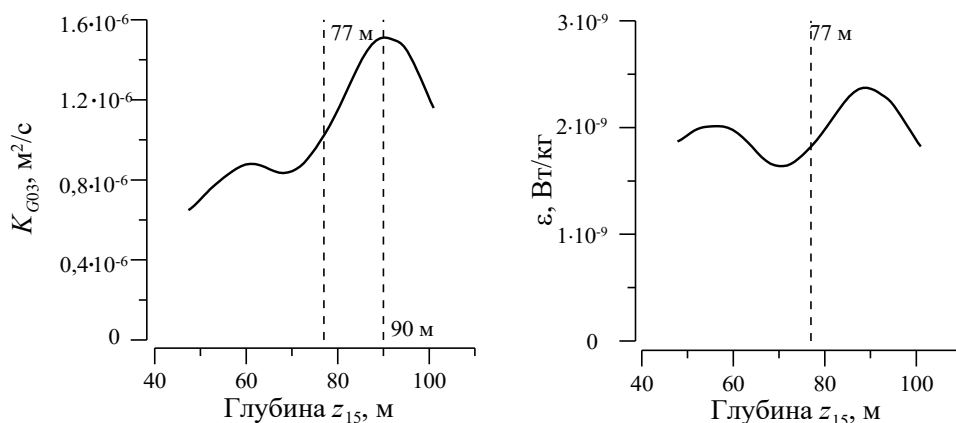


Рис. 4. Зависимости квадрата сдвига и квадрата аномалии частоты плавучести (*a*, *c* – исходные данные; *b*, *d* – после фильтрации) на изопикнической поверхности $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ от глубины. Серая линия на фрагменте *b* – отношение квадрата аномалии частоты плавучести к ее квадрату

Fig. 4. Dependencies of shear square and buoyancy frequency anomaly square (*a*, *c* – initial data; *b*, *d* – after filtration) on isopycnic surface $\sigma_t = 15 \text{ kg/m}^3$ upon depth. The grey line on fragment *b* is the ratio of square of buoyancy frequency anomaly to its square



Р и с. 5. Зависимость отношения квадрата измеренного сдвига к квадрату сдвига $GM76^*$ на изопикнической поверхности $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ от ее глубины (слева) и зависимости множителей параметризации $G03$ на изопикнической поверхности $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ от ее глубины (справа)
F i g. 5. Dependency of the ratio of measured shear square to $GM76^*$ shear square on isopycnic surface $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ upon its depth (left), and dependencies of $G03$ parameterization multipliers on isopycnic surface $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ upon its depth (right)



Р и с. 6. Зависимости коэффициента вертикальной турбулентной диффузии (слева) и скорости диссипации турбулентной кинетической энергии (справа) на изопикнической поверхности $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ от ее глубины
F i g. 6. Dependencies of vertical turbulent diffusion coefficient (left) and dissipation rate of turbulent kinetic energy (right) on isopycnic surface $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ upon its depth

Зависимость измеренных значений квадрата частоты плавучести ($N^2 = \frac{g}{\rho} \rho_z$, где g – ускорение свободного падения; ρ – плотность; ρ_z – ее производная по глубине) от глубины z_{15} приведена на рис. 3, с. Та же зависимость после фильтрации представлена на рис. 3, d. Частота плавучести почти монотонно уменьшается от ~ 14 цикл/ч в центре моря до ~ 10 цикл/ч вблизи континентального склона. При $z_{15} = 96 \text{ м}$ наблюдается слабо выраженный минимум.

Зависимость измеренного квадрата сдвига скорости течения ($Sh^2 = U_z^2 + V_z^2$, где U_z и V_z – производные по глубине восточной и северной компонент вектора скорости течения) от глубины z_{15} (рис. 4, а) имеет признаки случайного процесса. Это вполне объяснимо, поскольку сдвиг скорости течения в основном определяется внутренними волнами, пространственно-временные масштабы которых значительно меньше размера полигона и интервалов проведения измерений. После фильтрации (рис. 4, б) зависимость показывает уменьшение значения сдвига от центра моря в направлении континентального склона. Почти гармоническая составляющая зависимости с длиной волны около 70 км по горизонтали (35 м по глубине z_{15}), возможно, является следствием конкретной выборки данных. Также не исключается, что гармоническая составляющая определяется динамическими процессами, которые генерируются ОЧТ в нормальном ему направлении. Дальнейшие рассуждения по этому вопросу в рамках имеющихся данных будут носить дискуссионный характер.

Квадрат деформации определяется из соотношения, приведенного в работе [18]:

$$\xi_z^2 = \frac{(N^2 - N_{Pol}^2)^2}{N_{Pol}^4} = \frac{\delta^2}{N_{Pol}^4},$$

где N_{Pol}^2 – аппроксимирующий полином третьей степени зависимости $N^2(z_{15})$, который рассчитывался отдельно для набора станций каждой из экспедиций, после этого формировался общий для всех экспедиций массив $\delta^2 = (N^2 - N_{Pol}^2)^2$ – квадрат аномалии частоты плавучести (рис. 4, с). Аналогично сдвигу зависимость $\delta^2(z_{15})$ имеет признаки случайного процесса. После фильтрации зависимость $\delta_{Filtr}^2(z_{15})$ показывает уменьшение от центра моря до центра ОЧТ и почти постоянное значение между ОЧТ и континентальным склоном. Произведение $N^2 \cdot \xi_z^2 = \delta_{Filtr}^2 / N_{Filtr}^2$ характеризует потенциальную энергию мелко-масштабных процессов и так же, как сдвиг, содержит гармоническую составляющую с длиной волны около 70 км (рис. 4, б – серая линия).

Прикладные формулы для расчетов из работы [19] имеют следующий вид:

$$K_{G03} = K_0 \cdot \left(\frac{Sh_{Filtr}^2}{Sh_{GM76}^2} \right)^2 \cdot h_1(R_\omega) \cdot j \left(\frac{f}{N_{Filtr}} \right),$$

$$h_1(R_\omega) = \frac{3(R_\omega + 1)}{2\sqrt{2}R_\omega\sqrt{R_\omega - 1}},$$

$$j(f/N_{Filtr}) = \frac{f \operatorname{arctanh}(N_{Fit}/f)}{f_{30} \operatorname{arctanh}(N_0/f_{30})},$$

где $K_0 = 5 \cdot 10^6$ м²/с; f – локальная инерционная частота на 44° с. ш.; f_{30} – инерционная частота на 30° с. ш.; $N_0 = 5,24 \cdot 10^{-3}$ рад/с; значение Sh_{GM6}^2 рассчитывалось для канонического спектра внутренних волн GM76 с учетом разрешения по глубине LADCP-измерений скорости течения из работы [24]:

$$Sh_{GM76}^2 = \int_0^{100} \Phi_{Sh_{GM76}}(k) \cdot H_{ADCP}(k) \cdot H_{Dif_ADCP}(k) \cdot H_{DP_ADCP}(k) \cdot dk,$$

где $\Phi_{Sh_{GM76}}(k)$ – спектр сдвигов скорости течения для спектра GM76 в пространстве вертикальных волновых чисел (k); $H_{ADCP}(k) = (\sin(\pi 4k)/(\pi 4k))^4$ – передаточная функция пространственного осреднения, свойственного ADCP; $H_{Dif_ADCP}(k) = (\sin(\pi 4k)/(\pi 4k))^2$ – передаточная функция дифференцирования на приращении глубины 4 м; $H_{DP_ADCP}(k) = (\sin(\pi 4k)/(\pi 4k))^4$ – передаточная функция фильтрации оконного типа при обработке данных. Отношение сдвиг/деформация $R_\omega = \frac{Sh^2}{N^2 \cdot \xi_z^2}$ интерпретируется как отношение кинетической и потенциальной энергии внутренних волн и для спектра GM76 составляет 3. Его расчет проводился с учетом различия передаточных функций осреднения по глубине при обработке данных по плотности и скорости течения из следующего соотношения:

$$R_\omega \approx \frac{Sh_{GM76}^2}{N_{Filtr}^2 \cdot \xi_{zGM76}^2} \cdot \frac{Sh_{Filtr}^2 / Sh_{GM76}^2}{\xi_z^2 / \xi_{zGM76}^2} = 3 \cdot \frac{Sh_{Filtr}^2 \cdot N_{Filtr}^2}{\delta_{Filtr}^2} \cdot \frac{N_{Filtr}^2 \cdot \xi_{zGM76}^2}{Sh_{GM76}^2},$$

где $\xi_{zGM76}^2 = \int_0^{100} \Phi_{\xi_{zGM76}}(k) \cdot H_{Dif_CTD}(k) \cdot H_{DP_CTD}(k) \cdot dk$; $\Phi_{\xi_{zGM76}}(k)$ – спектр деформации GM76; $H_{Dif_CTD}(k) = (\sin(\pi 4k)/(\pi 4k))^2$ – передаточная функция дифференцирования на приращении глубины 4 м; $H_{DP_CTD}(k) = (\sin(\pi 1k)/(\pi 1k))^4$ – передаточная функция обработки CTD-данных. После соответствующего интегрирования получим отношение, которое использовалось при расчетах, $R_\omega \approx 2,1 \cdot \frac{Sh_{Filtr}^2 \cdot N_{Filtr}^2}{\delta_{Filtr}^2}$.

Отношение квадрата измеренного сдвига скорости течения к сдвигу Sh_{GM76}^2 (рис. 5, слева) в среднем составляет 0,35 и не имеет особенностей в ОЧТ (максимум находится в 20 км справа от него). Среднее значение представляется вполне реалистичным, поскольку в бесприливном Черном море единственным источником внутренних волн является ветер; кроме того, в работе рассматривается летний сезон. Зависимость $R_\omega(z_{15})$ (синяя линия на рис. 5, справа) близка к значению для канонического спектра внутренних волн (синяя штриховая линия на рис. 5, справа). Ближе к континентальному склону отношение сдвиг/деформация уменьшается до 2,2. Сомножитель h_1 , являющийся функцией отношения сдвиг/деформация, показывает резкое возрастание ближе к континентальному склону. Сомножитель j , который зависит от значения широты и частоты плавучести, незначительно уменьшается от центра моря к его периферии (зеленая линия на рис. 5, справа).

Значение $K_{G03}(z_{15})$ изменяется от $6,5 \cdot 10^{-7}$ м²/с при $z_{15} = 50$ м до максимального значения $1,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с при $z_{15} = 90$ м (рис. 6, слева). В центре моря значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии сопоставимо со

значением коэффициента молекулярной диффузии тепла ($1,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$). Максимум смещен вправо от ОЧТ на 26 км по горизонтали (23 м по глубине z_{15}) и, предположительно, обусловлен антициклоническими вихрями, в центре которых наблюдается интенсификация вертикального перемешивания. Полученные относительно малые значения коэффициента вертикального турбулентного перемешивания (в среднем $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) могут вызывать сомнения, но, тем не менее, они достаточно хорошо согласуются с данными микроструктурных зондов [1, 6]. Для более корректного сопоставления оценок параметров вертикального перемешивания по данным мелкокомасштабных и микроструктурных измерений необходимо проведение дополнительных синхронных измерений. Скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, определенная из соотношения Осборна $\varepsilon = K_{G03} \cdot N_{Filtr}^2 / 0,2$, в среднем составляет $2 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/кг}$ и содержит гармоническую составляющую с длиной волны около 70 км (рис. 6, справа). Полученное значение ε характерно для многих районов Мирового океана.

Заключение

В рамках данной работы были использованы профили плотности и скорости течения, полученные в шести летних экспедициях НИС «Профессор Водяницкий» 2016–2021 гг. в северной части Черного моря. Параметры вертикального турбулентного перемешивания определялись с применением параметризации G03. В качестве входных данных использовались профильтрованные зависимости необходимых параметров на изопикнической поверхности со значением условной плотности 15 кг/м^3 от ее глубины. Разрешающая способность измерителей плотности и скорости течения учитывалась при интегрировании канонического спектра внутренних волн.

Подтверждено наличие максимума частоты плавучести на изопикнической поверхности со значением условной плотности 15 кг/м^3 . Выявлено, что хорошо выраженный максимум удельной кинетической энергии в среднем наблюдается при глубине этой изопикны 77 м.

Получено, что значения квадратов сдвига скорости течения и аномалии частоты плавучести на указанной изопикнической поверхности уменьшаются в направлении от центра моря к континентальному склону. Зависимости сдвига и деформации выявляют гармоническую составляющую с длиной волны около 70 км по горизонтали в направлении, перпендикулярном ОЧТ. Квадрат измеренного сдвига составляет приблизительно треть от сдвига канонического спектра внутренних волн. Отношение сдвиг/деформация в центре моря приблизительно соответствует отношению для канонического спектра внутренних волн, которое вблизи континентального склона уменьшается до 2,3.

Среднее значение коэффициента вертикальной диффузии на изопикнической поверхности при $\sigma_t = 15 \text{ кг/м}^3$ в летнее время составляет $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, что неплохо согласуется с оценками по данным микроструктурных зондов. В центре моря значение коэффициента сопоставимо с коэффициентом молекулярной диффузии тепла. Максимальное значение, которое наблюдается при глубине изопикнической поверхности 90 м, достигает $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Максимум

смещен вправо относительно ОЧТ на расстояние по горизонтали ~ 26 км, что приблизительно соответствует радиусу мезомасштабного антициклонического вихря. Среднее значение скорости диссипации турбулентной кинетической энергии составляет $2 \cdot 10^{-9}$ Вт/кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние динамики течений на гидрофизическую структуру вод и вертикальный обмен в деятельном слое Черного моря / А. Г. Зацепин [и др.] // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 3. С. 327–339. EDN IAFSJJ.
2. *Munk W. H.* Abyssal recipes // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1966. Vol. 13, iss. 4. P. 707–730. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(66\)90602-4](https://doi.org/10.1016/0011-7471(66)90602-4)
3. Diapycnal mixing variations induced by subthermocline eddies observed in the north Pacific western boundary region / F. Nan [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. 997599. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.997599>
4. *Takahashi A., Hibiya T.* Assessment of Finescale Parametrizations of Deep Ocean Mixing in the Presence of Geostrophic Current Shear: Results of Microstructure Measurements in the Antarctic Circumpolar Current Region // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. Vol. 124, iss. 1. P. 135–153. <https://doi.org/10.1029/2018JC014030>
5. *Gregg M. C., Yakushev E.* Surface ventilation of the Black Sea's cold intermediate layer in the middle of the western gyre // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32, iss. 3. L03604. <https://doi.org/10.1029/2004GL021580>
6. Вертикальный турбулентный обмен в Черном море: экспериментальные исследования и моделирование / А. С. Самодуров [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 6. С. 735–759. EDN LCDZNK.
7. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря / А. Г. Зацепин [и др.] // *Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 1. С. 16–29. EDN RTOUUT.
8. *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. EDN ZCRXXJ.
9. *Podymov O. I., Zatsepin A. G., Ostrovskii A. G.* Fine Structure of Vertical Density Distribution in the Black Sea and Its Relationship with Vertical Turbulent Exchange // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, iss. 1. 170. <https://doi.org/10.3390/jmse11010170>
10. *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. EDN TDXUUT.
11. *Иванов В. А., Морозов А. Н.* Вертикальное перемешивание в деятельном слое Черного моря // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 482, № 4. С. 456–458. EDN YTJFCX.
12. *Морозов А. Н., Маньковская Е. В.* Холодный промежуточный слой Черного моря по данным экспедиционных исследований 2016–2019 годов // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 2. С. 5–16. EDN RALEUS.
13. *Gregg M. C., Sanford T. B., Winkel D. P.* Reduced mixing from the breaking of internal waves in equatorial waters // *Nature*. 2003. Vol. 422. P. 513–515. <https://doi.org/10.1038/nature01507>
14. *Henye F. S., Wright J., Flatté S. M.* Energy and action flow through the internal wave field: An eikonal approach // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1986. Vol. 91, iss. C7. P. 8487–8495. <https://doi.org/10.1029/JC091iC07p08487>
15. *Gregg M. C.* Scaling turbulent dissipation in the thermocline // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1989. Vol. 94, iss. C7. P. 9686–9698. <https://doi.org/10.1029/JC094iC07p09686>

16. The Application of Internal-Wave Dissipation Models to a Region of Strong Mixing / H. Wijesekera [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 1993. Vol. 23, iss. 2. P. 269–286. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1993\)023<0269:TAOIWD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1993)023<0269:TAOIWD>2.0.CO;2)
17. Polzin K. L., Toole J. M., Schmitt R. W. Finescale Parameterizations of Turbulent Dissipation // *Journal of Physical Oceanography*. 1995. Vol. 25, iss. 3. P. 306–328. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1995\)025<0306:FPOTD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1995)025<0306:FPOTD>2.0.CO;2)
18. Global Abyssal Mixing Inferred from Lowered ADCP Shear and CTD Strain Profiles / E. Kunze [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2006. Vol. 36, iss. 8. P. 1553–1576. <https://doi.org/10.1175/JPO2926.1>
19. Dissipation Rate Estimates from Microstructure and Finescale Internal Wave Observations along the A25 Greenland–Portugal OVIDE Line / B. Ferron [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2014. Vol. 31, iss. 11. P. 2530–2543. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00036.1>
20. Microstructure Mixing Observations and Finescale Parameterizations in the Beaufort Sea / E. C. Fine [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2021. Vol. 51, iss. 1. P. 19–35. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0233.1>
21. Validating Finescale Parameterizations for the Eastern Arctic Ocean Internal Wave Field / T. M. Baumann [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2023. Vol. 128, iss. 11. e2022JC018668. <https://doi.org/10.1029/2022JC018668>
22. Turbulence Across the Antarctic Circumpolar Current in the Indian Southern Ocean: Micro-Temperature Measurements and Finescale Parameterizations / Y. Sasaki [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2024. Vol. 129, iss. 2. e2023JC019847. <https://doi.org/10.1029/2023JC019847>
23. Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Пространственные характеристики холодного промежуточного слоя Черного моря летом 2017 года // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 4. С. 436–446. EDN BCSYUB.
24. Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Вертикальное перемешивание в деятельном слое Черного моря по данным мелкомасштабных измерений // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2022. № 4. С. 25–38. EDN TRZMDQ.

Об авторе:

Морозов Алексей Николаевич, старший научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследований, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9022-3379**, **Scopus Author ID: 7202104940**, **ResearcherID: ABB-4365-2020**, **SPIN-код: 6359-0395**, anmorozov@mhi-ras.ru