

Вертикальное перемешивание в нижней части основного пикноклина Черного моря

А. Н. Морозов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ anmorozov@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 07.11.2024; одобрена после рецензирования 18.02.2025;
принята к публикации 11.07.2025.

Аннотация

Цель. Оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в нижней части основного пикноклина в районе континентального склона и в глубоководной зоне Черного моря – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Использованы данные, собранные в 87-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий», проходившем в центральном секторе северной части Черного моря с 30 июня по 18 июля 2016 г. Профили температуры, солености и скорости течения измерялись CTD/LADCP-зондами. Предложен способ применения параметризации G03 для слоя толщиной ~ 200 м между изопикнами со значениями условной плотности 15,5 и 16,8 кг/м³. Для подавления шумов измерения использовались изопикническое осреднение по ансамблю станций и аппроксимация результирующих профилей параметров степенными функциями. Различие передаточных функций обработки CTD- и LADCP-данных учитывалось при интегрировании канонического спектра внутренних волн. По данным 20 глубоководных станций получен изопикнически осредненный профиль частоты плавучести, демонстрирующий слоистую степенную и экспоненциальную зависимости от глубины. Детально с представлением графического материала обсуждаются методические вопросы применения параметризации G03 в нижней части основного пикноклина Черного моря. Профили коэффициента вертикальной турбулентной диффузии K_{G03} показывают его почти постоянное значение ~ 2·10⁻⁶ м²/с в районе континентального склона и линейное возрастание с глубиной от 1·10⁻⁶ до 2·10⁻⁶ м²/с в глубоководной части моря. Максимальное значение рассчитанных потоков тепла составляет 12 мВт/м², что подтверждает их незначительное влияние на прогрев холодного промежуточного слоя. Поток соли на верхней границе слоя в районе континентального склона составил 6·10⁻⁵ г/(м²·с), в глубоководной части моря ~ 3·10⁻⁵ г/(м²·с). На нижней границе слоя потоки соли почти одинаковы для двух районов, они составили ~ 5·10⁻⁶ г/(м²·с). Отношение сдвиг/деформация проявляет резкое увеличение с глубиной и подчеркивает значительное различие природы мелкомасштабных процессов на границах нижней части основного пикноклина.

Выводы. Оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии с применением параметризации G03 хорошо согласуется со значениями, полученными в других районах моря по данным микроструктурных зондов. Вопрос сопоставимости оценок тем не менее остается открытым и требует проведения синхронных измерений микроструктурными и CTD/LADCP-зондами.

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 нижней части основного пикноклина Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 5. С. 586–598. EDN WNMFEK.

Original article

Vertical Mixing in the Lower Part of Main Pycnocline in the Black Sea

A. N. Morozov

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

✉ anmorozov@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to assess the vertical turbulent diffusion coefficient in the lower part of main pycnocline in the areas of continental slope and deep part of the Black Sea.

Methods and Results. The data collected during the 87th cruise of R/V “Professor Vodyanitsky” which was conducted in the central sector of the northern Black Sea from June 30 to July 18 in 2016, are used. The profiles of temperature, salinity and current velocity were measured by CTD/LADCP probes. A method for applying the G03 parameterization to the ~ 200 m thickness layer located between the isopycnals with conditional density 15.5 and 16.8 kg/m³ is proposed. To suppress measurement noise, the isopycnal averaging over the station ensemble as well as the approximation of the resulting parameter profiles by power functions are applied. The difference between the transfer functions of CTD and LADCP data processing is taken into account when integrating the canonical spectrum of internal waves. The data from 20 deep-sea stations permitted to obtain the buoyancy frequency profile averaged over the isopycnals, which demonstrated the layers of its power and exponential dependences on depth. The methodological problems in applying the G03 parameterization to the lower part of the Black Sea main pycnocline are discussed in detail including the graphic presentation of data. The profiles of vertical turbulent diffusion coefficient K_{G03} show its almost constant value of $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ m²/s in the region of continental slope and its linear increase with depth from $1 \cdot 10^{-6}$ m²/s to $2 \cdot 10^{-6}$ m²/s in the deep part of the sea. The maximum value of calculated heat fluxes reaches 12 mW/m² and confirms their insignificant effect on the heating of cold intermediate layer. The salt flux at the layer upper boundary in the area of continental slope is $6 \cdot 10^{-5}$ g/(m²·s) and in the deep part of the sea – $3 \cdot 10^{-5}$ g/(m²·s). At the layer lower boundary, the salt fluxes are almost the same for both areas and constitute $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ g/(m²·s). As for the shear-to-strain ratio, its sharp increase with depth is evident, and a significant difference in the nature of small-scale processes at the boundaries of lower part of the main pycnocline is clearly pronounced.

Conclusions. The estimate of vertical turbulent diffusion coefficient obtained using the G03 parameterization is in good agreement with the values resulted from the microstructural sounding in other sea regions. However, the issue of comparability of the estimates remains open and requires synchronous measurements with microstructural and CTD/LADCP probes.

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 FSB SI FRC MHI FNNN-2024-0012 “Operational Oceanology”.

For citation: Morozov, A.N., 2025. Vertical Mixing in the Lower Part of Main Pycnocline in the Black Sea. *Physical Oceanography*, 32(5), pp. 601-612.

Введение

Вертикальное турбулентное перемешивание оказывает значительное влияние на интенсивность биогеохимических процессов в морской среде [1] и играет важную роль в формировании водных масс, поддержании стратификации и модуляции океанской циркуляции [2]. Именно эти причины определяют неугасающий интерес океанологов к исследованию его характеристик в натуральных условиях на протяжении многих десятилетий [3].

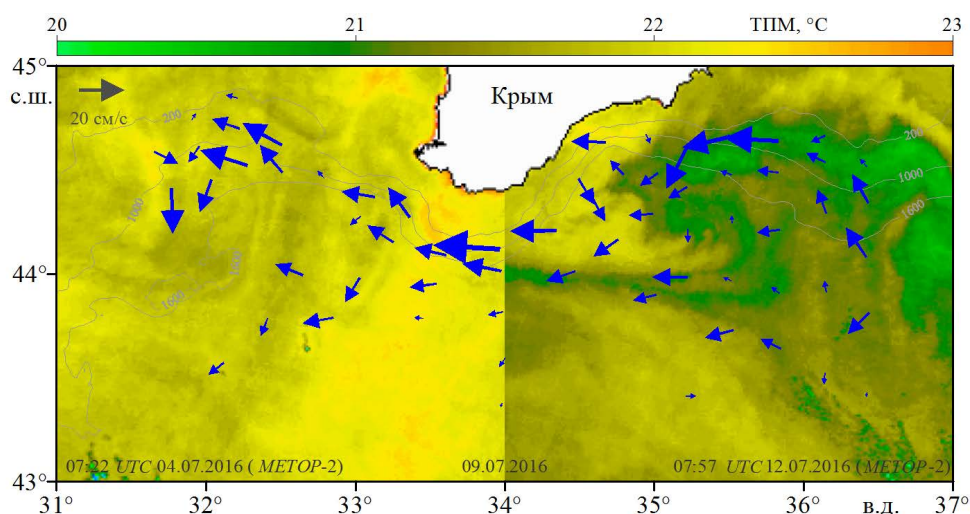
Вертикальное перемешивание в морской стратифицированной среде в основном связано с обрушением внутренних волн и сдвиговой неустойчивостью [4]. Основная часть турбулентной энергии сконцентрирована на масштабах менее одного метра [4, 5], что предполагает проведение измерений с сантиметровым разрешением по глубине [6]. В настоящее время оценки параметров вертикального турбулентного перемешивания, полученные по данным микроструктурных зондов, считаются наиболее объективными [1]. Однако применение микроструктурных зондов ограничено дороговизной аппаратуры и временными затратами при проведении измерений [7]. В глубоководной части Черного моря такие измерения проводились всего три раза [1, 8, 9]. В оксиклине значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии составило всего $(1-4) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [8], в основном пикноклине, по данным одной станции, оно было равно $(4-6) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [1]. В целом измерения, выполненные микроструктурными зондами, показывают относительно слабую интенсивность вертикального перемешивания в основном пикноклине Черного моря.

Альтернативная оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии может быть получена по данным синхронных измерений профилей плотности и скорости течения, выполненных с разрешением по глубине $\sim 10 \text{ м}$. Например, в Черном море по данным автономного зонда «Аквалог», установленного на кромке шельфа вблизи г. Геленджик [10], была исследована временная изменчивость вертикального перемешивания с использованием параметризации, основанной на значениях числа Ричардсона [11, 12]. Другим источником такого рода данных являются площадные гидрологические съемки, которые выполняются в экспедициях Морского гидрофизического института с 2004 г. [13]. Ожидается, что эти данные позволят получить новые предварительные знания о пространственной структуре параметров вертикального перемешивания.

Цель настоящей работы – исследовать вертикальное распределение параметров турбулентного перемешивания в основном пикноклине в районе континентального склона и глубоководной части Черного моря. Для оценки значения коэффициента вертикальной турбулентной диффузии использовалась параметризация G03 [14]. Выбор параметризации был обусловлен хорошей сопоставимостью рассчитанных параметров вертикального турбулентного перемешивания со значениями, полученными по данным измерений микроструктурными зондами [6, 7, 15–17]. Параметризация рассматривалась в теоретической работе [18], получила развитие в работе [19] и в конечной редакции представлена в работе [14]. Иногда в современной научной литературе параметризация имеет аббревиатуру *GHP* (*Gregg-Henyei-Polzin*).

Приборы и данные

В настоящей работе использованы данные о солёности, температуре и скорости течения, полученные в 87-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий», проходившем в северной части Чёрного моря (31–36,5° в. д., 43–45° с. ш.) с 30 июня по 18 июля 2016 г. Профили температуры и солёности измерялись CTD-зондом *SBE 911plus* с шагом по глубине 1 м. Измерение горизонтальных компонент скорости течения выполнялось погружаемым акустическим доплеровским профилометром течений (*LADCP*) на основе *WHM300* производства *RDI*. Устанавливались следующие параметры работы профилометра: размер сегмента глубины 4 м, использование широкополосного метода, дискретность по времени 1 с, скорость погружения/подъёма ~ 0,5 м/с. Обработка данных проводилась с учётом рекомендаций работы [13]. Всего было выполнено 106 станций, на 65 из них *LADCP/CTD*-зондирования осуществлялись до глубины не менее 350 м (рис. 1), на 20 станциях *CTD*-измерения проводились до 1900 м [20].



Р и с. 1. Расположение станций на фоне распределения температуры поверхности моря (ТПМ, °C) в 87-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий». Синими стрелками показана скорость течения на глубине 12 м, начало стрелки соответствует положению станции (всего 65 ст.)

F i g. 1. Station locations against the background of sea surface temperature (SST, °C) distribution during the 87th cruise of R/V “Professor Vodyanitsky”. Blue arrows show current velocity at the 12 m depth, the arrow tip corresponds to the station position (total 65 stations)

Динамика вод. Распределение скорости течения на глубине 12 м (рис. 1) на качественном уровне подтверждает циклонический характер крупномасштабной циркуляции вод Чёрного моря в районе проведения измерений. Наибольшие значения наблюдаются вблизи южного берега Крымского п-ова. Хорошо выраженных вихревых образований не зарегистрировано. В ходе рейса измерения почти в равной мере охватывали как район континентального склона, так и глубоководную часть моря.

Гидрология. Хорошо известно, что в основном пикноклине Чёрного моря изопокинические поверхности имеют куполообразную форму вследствие цик-

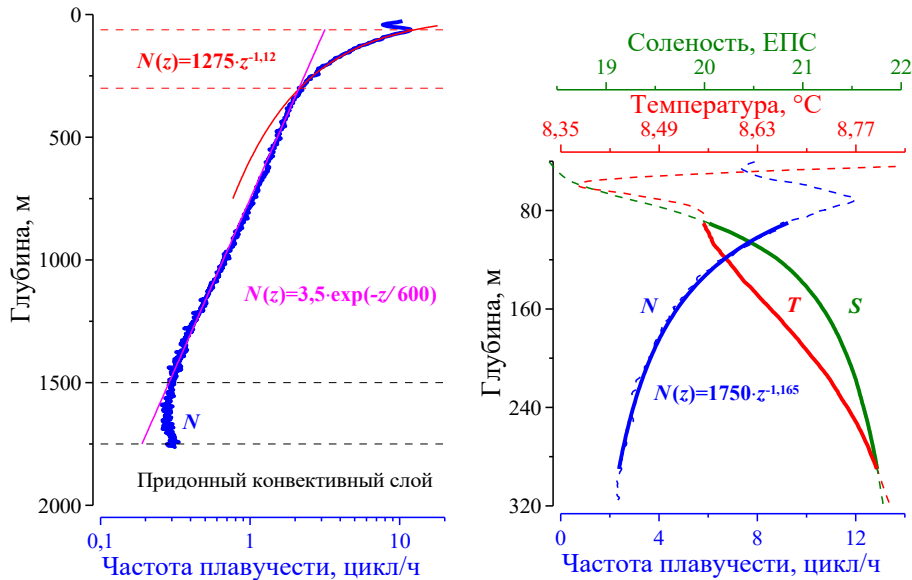
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 41 № 5 2025

лонического характера крупномасштабной циркуляции [21]. Их глубина увеличивается в направлении от центра моря к периферии. В районе проведения измерений перепад глубины изопикнической поверхности может достигать 70 м и более [22]. В настоящей работе для компенсации влияния куполообразной формы изопикнических поверхностей на качество средних профилей гидрологических параметров применялось изопикническое осреднение.

Алгоритм изопикнического осреднения следующий. Профиль условной плотности (σ_t), полученный на станции с наибольшей глубиной CTD-зондирования, использовался в качестве набора ее значений. Для каждого значения создавался массив исходных данных по всему ансамблю станций с использованием линейной интерполяции и проводился расчет средних значений параметров, включая глубину. Это обеспечивало относительную равномерность шага по глубине изопикнически осредненных зависимостей.

Для того чтобы представить слой, в котором проводились расчеты коэффициента вертикальной турбулентной диффузии (K), было выполнено изопикническое осреднение частоты плавучести ($N^2 = g \cdot \rho_z / \rho$, где g – ускорение свободного падения, ρ – плотность, ρ_z – ее вертикальная производная) по ансамблю из 20 глубоководных CTD-профилей (рис. 2, *слева*). Отметим, что столь глубоководные измерения в Черном море крайне редки [23] и это отчасти послужило причиной представления осредненного профиля для всей толщи моря. Красными штриховыми линиями выделен слой со степенной зависимостью N от глубины (красная линия), который и рассматривается в настоящей работе. Другие исследователи наблюдали степенную зависимость до 750 м [24], что, возможно, является следствием осреднения по горизонтам. От 350 до 1500 м N проявляет экспоненциальную зависимость от глубины (сиреневая линия). Параметры зависимости несколько отличаются от тех, что используются в каноническом спектре внутренних волн GM76 [25, 26]. Слой глубже 1500 м детально рассмотрен в работе [20]. С целью дать более наглядное представление о рассматриваемом слое (выделен сплошными цветными линиями) на рис. 2, *справа* приведены профили температуры (T), солёности (S) и N , изопикнически осредненные по ансамблю из 65 станций. Несмотря на то что степенная зависимость частоты плавучести от глубины прослеживается в диапазоне значений условной плотности 15–16,8 кг/м³, за верхнюю границу рассматриваемого слоя выбрана изопикна $\sigma_t = 15,5$ кг/м³. Выбор обусловлен тем, что на изопикнических поверхностях в окрестности $\sigma_t = 15$ кг/м³ в распределении N проявляется выраженная зависимость от горизонтальных координат [27]. Для этих расчетов используется иной математический аппарат в отличие от применяемого в данной работе.

Далее в работе станции были разбиты на две подгруппы, расположенные в районе континентального склона (29 ст.) на глубине менее 1600 м и в глубоководной части моря (36 ст.) на глубине более 1600 м.



Р и с. 2. Изопикнически осредненный по ансамблю из 20 станций профиль частоты плавучести (слева) и изопикнически осредненные по ансамблю из 65 станций профили температуры, солёности и частоты плавучести (справа)

F i g. 2. Buoyancy frequency profile averaged over the isopycnals of the 20 station ensemble (left), and temperature, salinity and buoyancy frequency profiles averaged over the isopycnals of the 65 station ensemble (right)

Уравнения и исходные данные

Прикладные формулы для расчета коэффициента вертикальной турбулентной диффузии K_{G03} заимствованы из работы [28]:

$$K_{G03} = K_0 \cdot \left(\langle Sh_{LADCP}^2 \rangle / Sh_{GM76*}^2 \right)^2 \cdot h_1(R_\omega) \cdot j(f / \langle N \rangle) = \\ = K_{G89} \cdot h_1(R_\omega) \cdot j(f / \langle N \rangle),$$

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

$$j(f / \langle N \rangle) = \frac{f \cdot \text{arch}(\langle N \rangle / f)}{f_{30} \cdot \text{arch}(N_0 / f_{30})},$$

где $K = 5 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$; $\langle Sh_{LADCP}^2 \rangle$ – среднее значение квадрата измеренного сдвига, $(Sh^2 = U_z^2 + V_z^2)$, (U_z, V_z) – производные по глубине (z) восточной и северной компонент скорости течения; K_{G89} – значение коэффициента для параметризации G89 [29]; f_{30} – инерционная частота на 30° с. ш.; $N_0 = 5,24 \cdot 10^{-3} \text{ рад/с}$; f – локальная инерционная частота на 44° с. ш.; угловые скобки означают осреднение по ансамблю станций. Sh_{GM76*}^2 рассчитывалось для GM76 с учетом разрешения по глубине LADCP-измерений:

$$Sh_{GM76*}^2 = \int_0^{100} F_{Sh_GM76}(k) \cdot H_{M_ADCP}(k) \cdot H_{Dif_LADCP}(k) \cdot H_{DP_LADCP}(k) \cdot k,$$

где $F_{Sh_GM76}(k)$ – спектр сдвигов скорости течения *GM76* [30] в пространстве вертикальных волновых чисел (k); $H_{M_ADCP}(k) = (\sin(\pi 4k)/(\pi 4k))^4$ – передаточная функция пространственного осреднения, свойственного *ADCP*; $H_{Dif_LADCP}(k) = (\sin(\pi 4k)/(\pi 4k))^2$ – передаточная функция дифференцирования на приращении глубины 4 м; $H_{DP_LADCP}(k) = (\sin(\pi 4k)/(\pi 4k))^4$ – передаточная функция фильтра оконного типа, использованного при обработке данных. Отношение сдвиг/деформация $R_\omega = \frac{Sh^2}{N^2 \cdot \zeta_z^2}$ [19] (ζ_z – деформация, вер-

тикальная производная смещения изопикны от положения равновесия) интерпретируется как отношение кинетической и потенциальной энергии внутренних волн и для *GM76* составляет 3 [30]. Расчет R_ω проводился с учетом различия передаточных функций при обработке данных по плотности и скорости течения из следующего соотношения:

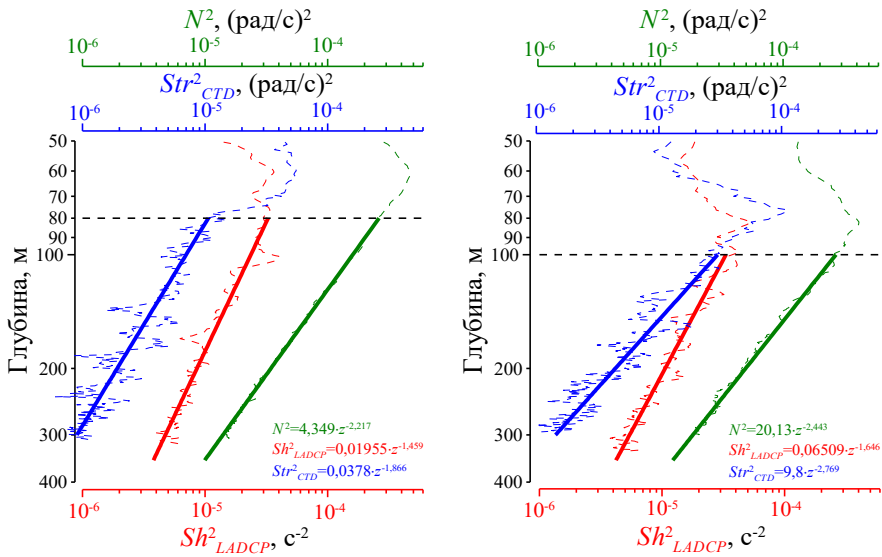
$$R_\omega \approx \frac{Sh_{GM76}^2}{\langle N^2 \rangle \cdot \zeta_{z_GM76}^2} \cdot \frac{\langle Sh_{LADCP}^2 \rangle / Sh_{GM76*}^2}{\langle \zeta_{z_CTD}^2 \rangle / \zeta_{z_GM76*}^2} = 3 \cdot \frac{\langle Sh_{LADCP}^2 \rangle}{\langle N^2 \rangle \cdot \langle \zeta_{z_CTD}^2 \rangle} \cdot \frac{\langle N^2 \rangle \cdot \zeta_{z_GM76*}^2}{Sh_{GM76*}^2},$$

где $\zeta_{z_CTD}^2 = \left\langle \left(N^2 - \langle N^2 \rangle \right)^2 \right\rangle / \langle N^2 \rangle^2$ – измеренное значение квадрата деформации [19]; $\zeta_{z_GM76*}^2 = \int_0^{100} F_{\zeta_{z_GM76}}(k) \cdot H_{Dif_CTD}(k) \cdot H_{DP_CTD}(k) \cdot dk$, $F_{\zeta_{z_GM76}}(k)$ –

спектр деформации *GM76* [30], $H_{Dif_CTD}(k) = (\sin(\pi 4k)/(\pi 4k))^2$ – передаточная функция дифференцирования на приращении глубины 4 м, $H_{DP_CTD}(k) = (\sin(\pi k)/(\pi k))^4$ – передаточная функция обработки *CTD*-данных. После соответствующего интегрирования получим отношение, которое использовалось при расчетах, $R_\omega \approx 2,1 \cdot \frac{\langle Sh_{LADCP}^2 \rangle}{\langle N^2 \rangle \cdot \langle \zeta_{z_CTD}^2 \rangle} = 2,1 \cdot \frac{\langle Sh_{LADCP}^2 \rangle}{\langle Str_{CTD}^2 \rangle}$. Величи-

на Str_{CTD}^2 введена для удобства графического представления.

В рассматриваемом слое зависимости $N^2(z)$, $Sh_{LADCP}^2(z)$, $Str_{CTD}^2(z)$ хорошо представляются степенными функциями (рис. 3). Результат является неожиданным и может быть проявлением закономерности, характерной для указанного слоя. Отметим, что наибольшее различие между центром моря и континентальным склоном наблюдается в зависимости $Str_{CTD}^2(z)$.



Р и с. 3. Изопикнически осредненные профили N^2 , Str_{CTD}^2 , и Sh_{LADCP}^2 (штриховые линии) и их аппроксимации степенными функциями (сплошные) для глубоководной части (*слева*) и континентального склона (*справа*)

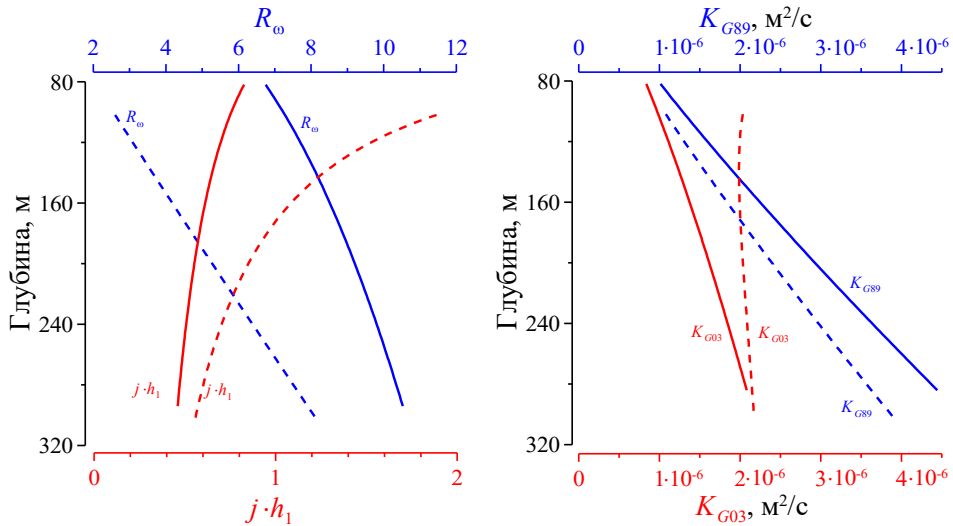
Fig. 3. Profiles N^2 , Str_{CTD}^2 , and Sh_{LADCP}^2 (dashed lines) averaged over the isopycnals, and their approximations by power functions (solid lines) for the deep-sea part (*left*) and the continental slope (*right*)

Предварительная обработка данных с использованием осреднения параметров на изопикнических поверхностях и аппроксимации степенными функциями преследовала цель подавить случайную составляющую шума измерений и погрешности оценки средних значений случайных процессов на относительно малой выборке. Далее при оценке K использовались степенные зависимости, для этого $\langle N^2 \rangle$, $\langle N \rangle$, $\langle Sh_{LADCP}^2 \rangle$, Sh_{GM76}^2 , $\langle Str_{CTD}^2 \rangle$, Str_{GM76}^2 в формулах заменяются их аппроксимирующими функциями (рис. 3).

Результаты и обсуждение

Рассмотрим поведение сомножителей параметризации G03 в указанном слое (рис. 4, *слева*). Отношение сдвиг/деформация, играющее важную роль в оценке K_{G03} [31], увеличивается с глубиной как в глубоководной части моря, так и в районе континентального склона. При этом в глубоководной части значения R_0 больше, что может быть связано с влиянием внутренних волн с частотой, близкой к инерционной [32–34], кинетическая энергия которых значительно превосходит потенциальную [35]. В результате сомножитель $j \cdot h_1$ в глубоководной части уменьшается в два раза, в то время как в районе континентального склона он уменьшается почти в пять раз. Это приводит к тому, что значение K_{G03} в центральной части моря увеличивается с глубиной от $1 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-6}$ м²/с, а в районе континентального склона оно со-

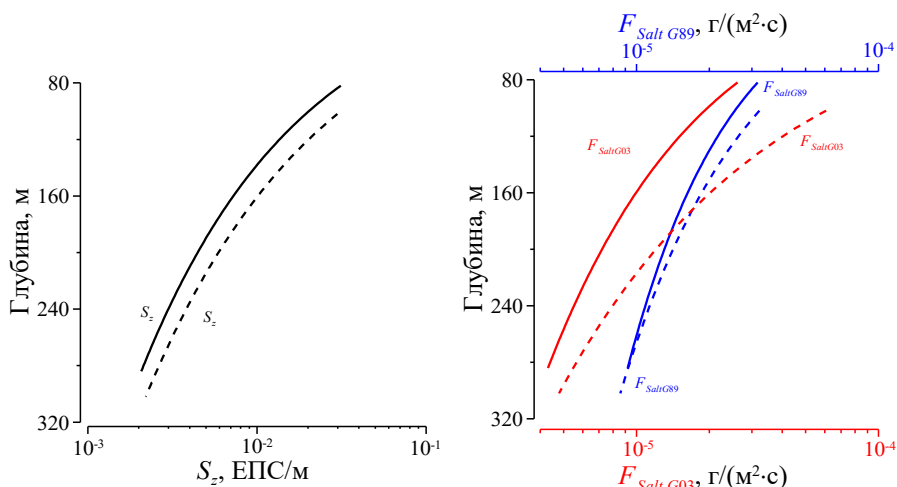
храняется почти постоянным, $\sim 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Более ранняя параметризация G89, пропорциональная четвертой степени отношения измеренного сдвига к его значению для GM76, дает подобные зависимости K_{G89} для глубоководной части моря и континентального склона.



Р и с. 4. Профили R_ω и $j \cdot h_1$ (слева) и результирующие профили коэффициента вертикальной турбулентной диффузии для параметризаций G03 и G89 (справа) (сплошные линии – для глубоководной части моря, штриховые – для континентального склона)
F i g. 4. Profiles R_ω and $j \cdot h_1$ (left) and resulting profiles of the vertical turbulent diffusion coefficient for the G03 and G89 parameterizations (right) (solid lines show deep part of the sea, dashed lines – continental slope)

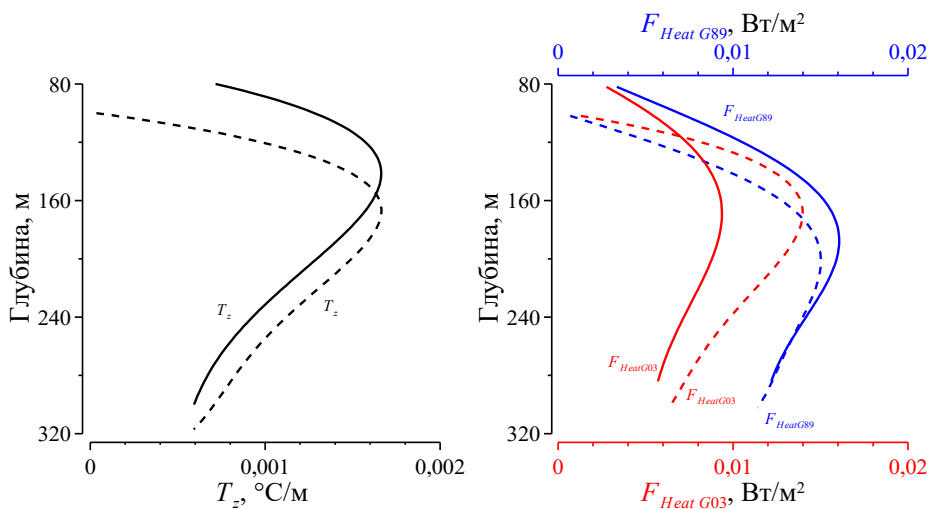
По сравнению с оценками, полученными на основе измерений микроструктурными зондами [1, 8], параметризации G03 и G89 проявляют хорошую сопоставимость. По характеру зависимости K от глубины параметризация G03 проявляет лучшую согласованность. Вопрос сопоставимости оценок K , полученных по данным микроструктурных зондов и стандартных CTD/LADCP-измерений, для Черного моря остается открытым в связи с отсутствием результатов синхронных измерений.

Определение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии отчасти вытекает из необходимости оценки вертикальных потоков различных субстанций в морской среде с целью лучшего понимания механизмов формирования их стратификации. В настоящей работе на основе полученных значений $K_{G..}$ была сделана оценка потока соли (рис. 5, справа), который рассчитывался из соотношения $F_{SaltG..} = \rho \cdot K_{G..} \cdot S_z$, где S_z – вертикальная производная солёности (рис. 5, слева). Поток соли $F_{SaltG03}$ на верхней границе слоя в глубоководной части моря почти в два раза выше, чем в районе континентального склона. На нижней границе его значения почти одинаковы для двух районов.



Р и с. 5. Профили вертикальной производной солености (слева) и потоков соли (справа) для глубоководной части моря (сплошные линии) и континентального склона (штриховые)
F i g. 5. Profiles of the vertical derivative of salinity (left) and salt fluxes (right) for the deep-sea part (solid lines) and the continental slope (dashed lines)

Поток тепла рассчитывался по соотношению $F_{HeatG.} = \rho \cdot C_w \cdot K_{G..} \cdot T_z$, где $C_w = 4200$ Дж/(°С·кг) – теплоемкость воды, T_z – вертикальная производная температуры (рис. 6, слева). Параметризации G03 и G89 дают относительно небольшие значения потоков тепла для двух районов, в максимуме достигающие ~ 16 мВт/м² (рис. 6, справа). По сути это означает, что поток тепла из глубины моря не будет оказывать значительного влияния на прогрев холодного промежуточного слоя.



Р и с. 6. Профили вертикальной производной температуры воды (слева) и потоков тепла (справа) для глубоководной части моря (сплошные линии) и континентального склона (штриховые)
F i g. 6. Profiles of the vertical derivative of water temperature (left) and heat fluxes (right) for the deep-sea part (solid lines) and the continental slope (dashed lines)

Заключение

В данной работе представлен способ применения параметризации G03 для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в слое толщиной ~ 200 м по данным стандартных CTD/LADCP-измерений. С целью подавления случайной составляющей шумов измерений использовались изопикническое осреднение по ансамблю станций и аппроксимация результирующих профилей степенными функциями. Различие передаточных функций обработки CTD- и LADCP-данных учитывалось при интегрировании канонического спектра внутренних волн GM76.

Результирующие профили коэффициента вертикальной турбулентной диффузии K_{G03} показывают его почти постоянное значение $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ м²/с в районе континентального склона и линейное возрастание с глубиной от $1 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-6}$ м²/с в глубоководной части моря. Несмотря на малые значения коэффициента, они хорошо согласуются с оценками, полученными по данным измерений микроструктурными зондами.

Рассчитанные потоки тепла показывают небольшие значения, в максимуме достигающие 12 мВт/м², что подтверждает их незначительное влияние на прогрев холодного промежуточного слоя. Поток соли на верхней границе слоя в районе континентального склона составил $6 \cdot 10^{-5}$ г/(м²·с), в глубоководной части моря $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ г/(м²·с). На нижней границе слоя потоки соли почти одинаковы для обоих районов, $\sim (4-5) \cdot 10^{-6}$ г/(м²·с).

В нижней части основного пикноклина Черного моря в отношении сдвиг/деформация проявляется резкое увеличение с глубиной, что может быть результатом взаимодействия внутренних волн с мелкими неоднородностями плотностной стратификации.

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. Munk W. H., Anderson E. R. Notes on the theory of the thermocline // Journal of Marine Research. 1948. Vol. 7, iss. 3. P. 276–295.
4. Finescale parameterizations of turbulent dissipation / K. L. Polzin [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2014. Vol. 119, iss. 2. P. 1383–1419. <https://doi.org/10.1002/2013JC008979>
5. Turbulent diapycnal fluxes as a pilot Essential Ocean Variable / A. Le Boyer [et al.] // Frontiers in Marine Science. 2023. Vol. 10. 10:1241023. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1241023>
6. 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>
7. Takahashi A., Hibiya T. Assessment of Finescale Parameterizations 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. 2018. Vol. 124, iss. 1. P. 135–153. <https://doi.org/10.1029/2018JC014030>

8. *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>
9. 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.
10. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря / А. Г. Зацепин [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 1. С. 16–29. EDN RTOUUT. <https://doi.org/10.7868/S0002351513060163>
11. *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. <https://doi.org/10.7868/S0030157417040049>
12. *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>
13. *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. EDN YOFQNN.
14. *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>
15. 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>
16. 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>
17. Validation 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>
18. *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>
19. *Polzin K. L., Toole J. M., Smith 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)
20. *Морозов А. Н., Маньковская Е. В.* Характеристики придонного конвективного слоя Черного моря по натурным данным (июль 2016 года) // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 5. С. 548–561. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-5-548-561>
21. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с.
22. *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. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-4-436-446>
23. *Stanev E. V., Chtirkova B., Peneva E.* Geothermal Convection and Double Diffusion Based on Profiling Floats in the Black Sea // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48, iss. 2. e2020GL091788. <https://doi.org/10.1029/2020GL091788>
24. *Самодуров А. С.* Взаимодополняемость различных подходов для оценки интенсивности вертикального турбулентного обмена в естественных стратифицированных бассейнах // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 37–48. EDN XGXULL. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-6-37-48>

25. Garrett C., Munk W. Space-time scales of internal waves: A progress report // *Journal of Geophysical Research*. 1975. Vol. 80, iss. 3. P. 291–297. <https://doi.org/10.1029/JC080i003p00291>
26. Cairns J. L., Williams G. O. Internal wave observations from a midwater float, 2 // *Journal of Geophysical Research*. 1976. Vol. 81, iss. 12. P. 1943–1950. <https://doi.org/10.1029/JC081i012p01943>
27. Морозов А. Н. Вертикальное перемешивание в основном пикноклине Черного моря в летний сезон // *Морской гидрофизический журнал*. 2025. Т. 41, № 3. С. 251–263. EDN POFJH.
28. 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>
29. 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>
30. Fer I. Scaling turbulent dissipation in an Arctic fjord. // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2006. Vol. 53, iss. 1–2. P. 77–95. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.01.003>
31. Chinn B. S., Girton J. B., Alford M. H. The Impact of Observed Variations in the Shear-to-Strain Ratio of Internal Waves on Inferred Turbulent Diffusivities // *Journal of Physical Oceanography*. 2016. Vol. 46, iss. 11. P. 3299–3320. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-15-0161.1>
32. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейферным данным / В. М. Журбас [и др.] // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 1. С. 34–48. EDN OWJSRJ.
33. Seasonal Variability of Near-Inertial Internal Waves in the Deep Central Part of the Black Sea / E. Khimchenko [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, iss. 5. 557. <https://doi.org/10.3390/jmse10050557>
34. Khimchenko E., Ostrovskii A. Observations of Near-Inertial Internal Waves over the Continental Slope in the Northeastern Black Sea // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, iss. 3. 507. <https://doi.org/10.3390/jmse12030507>
35. Морозов А. Н., Маньковская Е. В., Федоров С. В. Инерционные колебания в северной части Черного моря по данным натурных наблюдений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 1. С. 43–53. EDN UCLNDV. <https://doi.org/10.7868/S2073667321010044>

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