

Оценка интенсивности вертикального турбулентного обмена в слое основного пикноклина на прикерченском участке шельфа Черного моря

Д. А. Казаков*, А. С. Самодуров

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
*e-mail: engineer.dk@mail.ru

Поступила 25.03.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Исследована сезонная изменчивость коэффициента вертикального турбулентного обмена в верхнем стратифицированном слое Черного моря. Используемые в работе данные экспедиций, содержащие сведения о микроструктуре физических полей, были получены в различные гидрологические сезоны и охватывали северо-восточную часть Черного моря в районе прикерченского участка склона шельфа. Сбор данных осуществлялся в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в 2016–2019 гг. с использованием зондирующего комплекса «Сигма-1». На основе полуэмпирических методов оценки вертикального турбулентного обмена в глубоководной области Черного моря по пульсационным характеристикам потока установлена зависимость коэффициента вертикальной турбулентной диффузии K от частоты плавучести N в исследуемом слое с построением соответствующих графиков и их аппроксимирующими степенными зависимостями $K \cong A \cdot N^\alpha$. Проанализировано вертикальное распределение коэффициента K с глубиной. Выполнен сравнительный анализ полученных зависимостей и результатов 1.5D-модели. Анализ данных измерений показал, что полученные в работе результаты не противоречат исходной модели. Результаты работы также можно использовать для оценки вертикальных потоков тепла, соли и других растворенных химических и биологических веществ в зависимости от стратификации в исследуемой части Черного моря для различных сезонов.

Ключевые слова: диссипация энергии, стратифицированные слои, турбулентный обмен, частота плавучести, измерительный комплекс, моделирование турбулентности, прикерченский участок, обрушение внутренних волн.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0003 «Океанологические процессы».

Для цитирования: Казаков Д. А., Самодуров А. С. Оценка интенсивности вертикального турбулентного обмена в слое основного пикноклина на прикерченском участке шельфа Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 94–105. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-94-105

© Казаков Д. А., Самодуров А. С., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Estimation of the Vertical Turbulent Exchange Intensity in the Main Pycnocline Layer in the Prikerchensky Area of the Black Sea Shelf

D. A. Kazakov*, A. S. Samodurov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: engineer.dk@mail.ru*

Submitted 25.03.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

The paper investigates the seasonal variability of the vertical turbulent exchange coefficient in the upper stratified layer of the Black Sea. The expedition data used in this work containing information on the microstructure of physical fields were obtained in different hydrological seasons covering the northeastern part of the Black Sea in the Prikerchensky area of the shelf slope. The data were collected during cruises of r/v “Professor Vodyanitsky” in 2016–2019 using “Sigma-1” sounding complex. Based on the semi-empirical methods of assessment of vertical turbulent exchange in the deep-water area of the Black Sea, the dependence of the vertical turbulent diffusion coefficient K on the buoyancy frequency N in the studied layer was established from the flow fluctuation characteristics, with the corresponding graphs and their approximating power-law dependences $K \cong A \cdot N^\alpha$ plotting. In addition, the vertical distribution of the K coefficient with depth was analyzed. Comparative analysis of the obtained dependences with the results of the $1.5D$ model was carried out. The analysis of the measurement data showed that the results obtained in this work do not contradict the original model. The results can also be used to assess the vertical fluxes of heat, salt and other dissolved chemical and biological substances depending on stratification in the studied part of the Black Sea for different seasons.

Keywords: energy dissipation, stratified layers, turbulent exchange, buoyancy frequency, measuring complex, turbulence modelling, Prikerchensky area, internal wave collapse.

Acknowledgments: the work was carried out under the state assignment on topic no. 0827-2019-0003 “Oceanological processes”.

For citation: Kazakov, D.A. and Samodurov, A.S., 2021. Estimation of the Vertical Turbulent Exchange Intensity in the Main Pycnocline Layer in the Prikerchensky Area of the Black Sea Shelf. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 94–105. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-94–105 (in Russian).

Введение

Для расчетов по актуальным океанологическим и климатическим моделям, охватывающим регион Черного моря, необходимо знать как можно более точное значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии $K(z)$ в различных слоях бассейна моря. На значение этого коэффициента влияет немало природных процессов, затрудняя его объективную оценку. Среди них, кроме различных видов адвективного переноса, можно назвать плотностную конвекцию, двойную диффузию, придонное трение, донный геотермальный поток тепла и другие. Вместе с тем анализ накопленной информации показывает, что наиболее значительный вклад в вертикальный турбулентный обмен для стратифицированных слоев в масштабах всего Черного моря вносит сдвиговая неустойчивость инерционно-гравитационных

внутренних волн (предельно низкочастотных квазигоризонтальных периодических по глубине течений), сопровождающаяся их локальным разрушением по достижении определенной амплитуды и формированием турбулентных перемешанных пятен [1]. При этом северо-восточную часть Черного моря (СВЧМ) можно рассматривать отдельно от основного бассейна, что обусловлено ее гидрологическим режимом, топографией дна, влиянием апвеллингов и субмезомасштабных вихрей.

При наличии достаточно большого количества сложных гидрофизических процессов в СВЧМ создание моделей для описания интенсивности вертикального турбулентного обмена в стратифицированных слоях должно опираться на объективные данные о сезонной и пространственной изменчивости основных характеристик перемешивания. На протяжении последних пятнадцати лет сотрудниками отдела турбулентности Морского гидрофизического института РАН проводился сбор ключевых натуральных гидрофизических параметров, полученных с помощью зондирующего комплекса «Сигма-1» [2], для определения характеристик вертикального турбулентного обмена в Черном море. Это позволило получить достаточное количество данных, на основании которых можно сделать статистически важные выводы.

Экспериментальные данные и методы их обработки

В работе использовались данные, собранные в районе прикерченского участка шельфа СВЧМ, представленном на рис. 1.

Данные собирали с помощью измерительного комплекса «Сигма-1», принцип работы которого заключается в регистрации пульсационных гидрофизических величин исследуемого бассейна в процессе свободного падения зонда на кабель-тросе со скоростью $0.7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ до заданной глубины. Комплекс

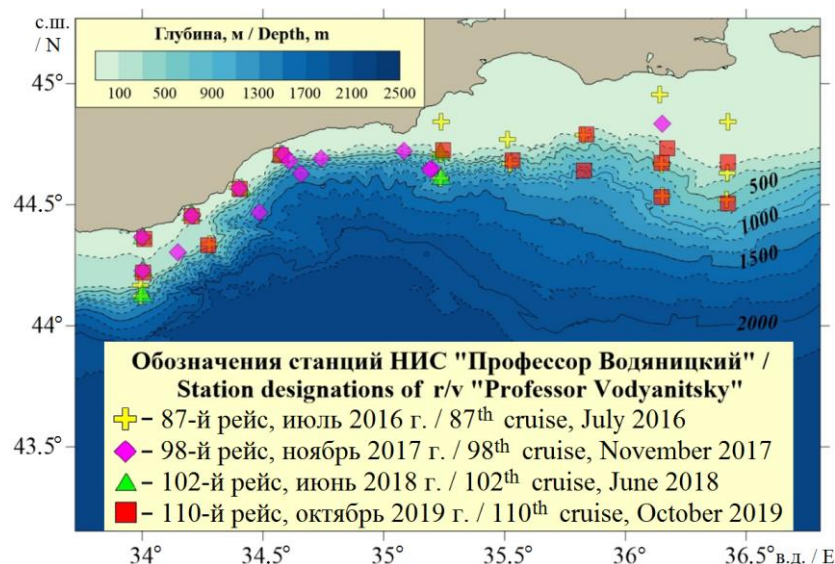


Рис. 1. Карта станций в зоне прикерченского участка шельфа Черного моря и его окрестностях

Fig. 1. Stations in the Prikerchensky area of the Black Sea shelf and its surroundings

оборудован вспомогательными датчиками, регистрирующими фоновые характеристики зонда и его окружения (осредненные характеристики среды), датчиком контроля положения для устранения пульсаций, связанных с колебаниями самого измерителя. Электропитание комплекса и передача полученных цифровых значений основных гидрофизических величин ведется по кабелю. Основные характеристики зондирующего прибора [2] приведены в таблице. Здесь электропроводность представлена в виде безразмерной величины R – отношения электропроводности *in situ* к стандартной электропроводности при солёности $S = 35$ ‰, температуре $t = 15$ °C и давлении $p = 0$ бар (при отсчете от 1 ст. атм) (в соответствии с ГСССД 77-84).

Скорость диссипации турбулентной энергии ε и коэффициенты вертикальной турбулентной диффузии K оценивались путем установления их зависимости от описанного в работах [3, 4] вертикального масштаба перемешанного пятна L для фиксированного интервала глубин. При этом были использованы зависимости

$$K \cong \frac{R_f}{1-R_f} \frac{\varepsilon}{N^2}, \quad \varepsilon \cong 0.1 \cdot L^3 N^3, \quad (1)$$

Технические характеристики зондирующего измерителя «Сигма-1» [2]

Technical characteristics of “Sigma-1” measuring probe [2]

Измеряемый параметр / Measured parameter	Диапазон / Range	Разрешение / Resolution	Погрешность / Error	Частотный диапазон, Гц / Frequency range, Hz	Частота дискретизации, Гц / Sampling frequency, Hz
Компоненты пульсации скорости течения U', V', W' / Current velocity fluctuation components U', V', W'	$\pm 2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ / $\pm 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$10^{-3} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ / $10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\pm 10 \%$	1÷20	100
Температура / Temperature	0–30 °C	0.01 °C	$\pm 0.5^\circ$	0÷2	20
Пульсации температуры / Temperature fluctuations	± 2 °C	0.001 °C	$\pm 5 \%$	0.1÷20	100
Электропроводность / Electrical conductivity	0–0.9	0.00025	$\pm 5 \cdot 10^{-3}$	0÷2	20
Пульсации электропроводности / Electrical conductivity fluctuations	0.005	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 5 \%$	0.1÷20	100
Крен и дифферент измерителя / Pitch, roll	$\pm 20^\circ$	0.01°	$\pm 1^\circ$	0÷2	100
Угол азимута измерителя / Azimuth angle	0–360°	1.0°	$\pm 5^\circ$	0÷2	100
Давление на горизонте / Pressure	0–1 МПа / 0–1 МПа	$5 \cdot 10^{-4}$ МПа / $5 \cdot 10^{-4}$ МПа	$\pm 0.5 \%$	–	20

где ε – скорость диссипации энергии; K – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии; $N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$ – частота плавучести; R_f – динамическое число Ричардсона (отношение скорости возрастания потенциальной энергии в системе к скорости поступления в эту систему энергии, расходуемой на перемешивание) в актах сдвиговой неустойчивости стратифицированного потока и обрушения волновых возмущений.

Был выбран именно этот подход, потому что он основан на анализе природных спектров температуры, рассчитанных по данным вертикальных зондирований [5]. В исследуемом районе распределение температуры вносит устойчивый вклад в вертикальный градиент плотности, что позволяет применить подход с использованием данных с зондирующего комплекса «Сигма-1».

Значение R_f в данной работе принималось равным $\frac{1}{4}$ в соответствии с работами [6, 7]. Эффективный вертикальный масштаб турбулентных пятен L определялся исходя из вертикального масштаба устойчивого минимума в мелкомасштабной области вертикального спектра первых разностей [8]. Пример расчета спектра показан на рис. 2, на котором можно наблюдать процесс перераспределения энергии в поле внутренних волн в заданном интервале глубин. Данный расчет был произведен по всем глубинам замеров с интервалом 10 м для каждой из станций.

В обзорной работе [9] на основе предложенной модели вертикального турбулентного обмена с использованием результатов расчета по формуле (1) показано, что зависимость величины K от N в условиях одной из частей

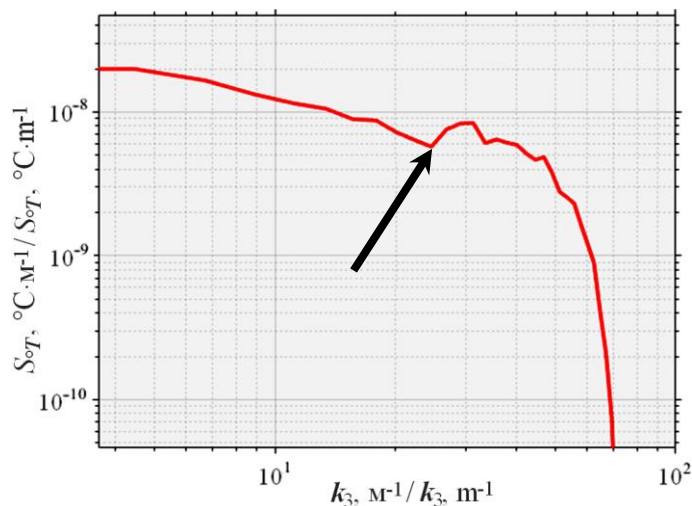


Рис. 2. Пример расчета вертикального спектра первых разностей по данным зондирующего комплекса «Сигма-1» со ст. 56, выполненной НИС «Профессор Водяницкий» 10.07.2016 г. в диапазоне глубин 80–90 м

Fig. 2. An example of the first differences vertical spectrum calculation according to the “Sigma-1” sounding complex data collected at station 56 of r/v “Professor Vodyanitskiy” on 10 July 2016 in a depth range of 80–90 m

основного пикноклина в глубоководной области Черного моря может быть записана в виде

$$K \cong 5.6 \cdot 10^{-5} N^{-1}. \quad (2)$$

Соотношение (2) описывает верхний, сильно стратифицированный слой основного пикноклина. Коэффициент в этой формуле находится из эмпирической зависимости $L(N)$, которая в данной работе описывается выражением

$$L \cong 8.02 \cdot N^{-1}.$$

Результаты 1.5D-модели из работы [9] и результаты, полученные в этой работе, использовались для анализа данных измерений в исследуемом слое.

Анализ данных

Прежде всего следует отметить, что массив натуральных данных из общего банка подбирался исходя из наилучшего расположения станций НИС в пространстве и достоверности полученных данных, что объясняет неоднородность измерений по сезонам. К примеру, здесь отсутствуют данные за период, охватывающий август и сентябрь, тем не менее имеющийся массив позволяет проследить сезонную изменчивость стратификации и коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в исследуемом регионе. Сезонный ход распределения частоты плавучести N с глубиной z в верхнем слое основного пикноклина показан на рис. 3.

Показанный зеленой линией график характеризует завершение формирования сезонного верхнего термоклина, который будет устойчив до поздней осени. При этом очевидно, что гидрологический режим в нижней части

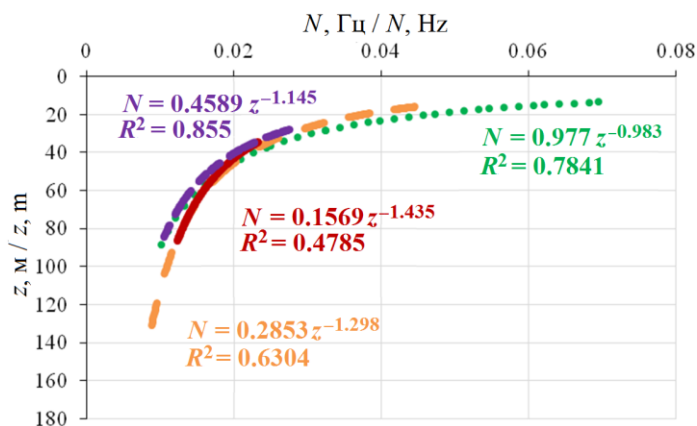


Рис. 3. Аппроксимации экспериментальных степенных зависимостей частоты плавучести N от глубины z на склоне шельфа прикерченского участка: ●●●● – июнь 2018 г.; — – июль 2016 г.; — – октябрь 2019 г.; — – ноябрь 2017 г. R^2 – коэффициент детерминации

Fig. 3. The experimental dependences approximations of the buoyancy frequency N on the depth z on the shelf slope of the Prikerchensky area: ●●●● – June 2018; — – July 2016; — – October 2019; — – November 2017. R^2 is the determination coefficient

рассматриваемого слоя (от 70 до 100 м) остается приблизительно одинаковым на протяжении всего охваченного сезонного периода, о чем свидетельствует монотонное убывание градиента плотности. Можно отметить плавное уменьшение степени аппроксимационной зависимости $N \approx N_0 z^{\beta}$ при переходе от летнего сезона к осеннему: $N_{\text{летом}} \approx 0.9 z^{-1.0}$, $N_{\text{осенью}} \approx 0.2 z^{-1.3}$; что, однако, согласуется с осредненной степенной аппроксимацией этого соотношения в основном пикноклине Черного моря $N \approx 1.25 z^{-1}$, представленной в [9].

Дальнейший анализ данных с использованием зависимостей (1) и метода, описанного в работе [8], позволяет судить о характере вертикального турбулентного обмена в верхней части основного пикноклина на склоне прикерченского участка в рассмотренных интервалах глубин z . Полученные значения коэффициента вертикального турбулентного обмена K были осреднены для соответствующих промежутков. На рис. 4 приведены осредненные по глубинам локализации зависимости $K(N)$ и их степенные аппроксимации в исследованном районе.

Как оказалось, коэффициенты всех четырех зависимостей $K(N)$ существенно отличаются от результатов 1.5D-моделирования [9]. Причиной этого, с одной стороны, является значительное удаление рассматриваемого участка

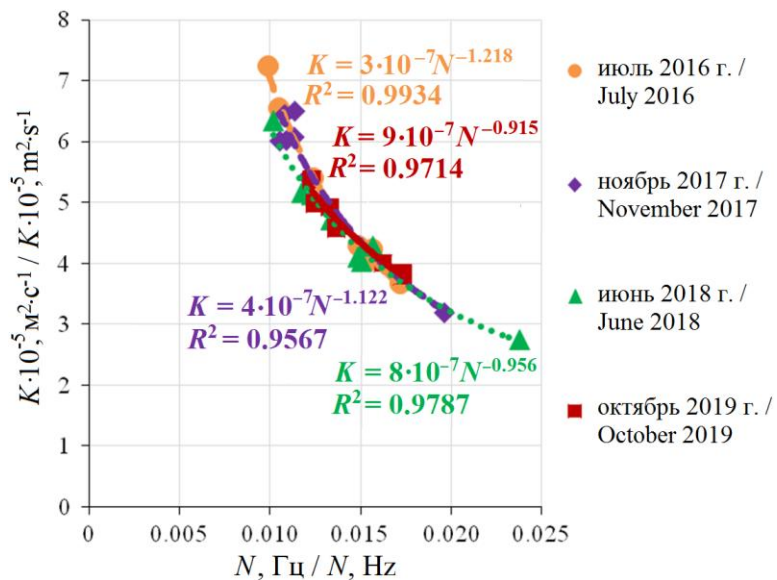


Рис. 4. Экспериментальные точки зависимостей осредненного по интервалам глубин коэффициента вертикальной турбулентной диффузии K от частоты плавучести N с их аппроксимирующими степенными зависимостями в разные сезоны. Обозначения см. на рис. 3

Fig. 4. Experimental values of the dependences of the vertical turbulent diffusion coefficient K averaged over the depth intervals on the buoyancy frequency N with their approximating power-law dependences in different seasons. See designations in Fig. 3

от основной части Черного моря, главным энергоснабжающим процессом в которой является Основное Черноморское течение (ОЧТ), в то время как для северо-восточной части моря характерно сезонное появление и увеличение числа антициклонических вихрей в летний период при уменьшении средней скорости струи ОЧТ [10], а также наклонное дно с резким свалом глубин. Это говорит об особом гидрологическом режиме в данном районе, который не относится к глубоководной части. С другой стороны, данные для 1.5D-модели вертикального турбулентного обмена в стратифицированных слоях Черного моря были собраны и осреднены по всей площади бассейна за последние 70 лет. Однако несмотря на это степенная часть зависимостей показывает достаточно хорошую сходимость в значениях степени как между собой, так и с 1.5D-моделью, что свидетельствует о наличии здесь физических механизмов, характерных для исследуемого слоя.

Более подробное распределение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии с глубиной и его сезонный ход можно пронаблюдать на рис. 5. Очевидно, что наибольшие значения коэффициента в верхней части рассматриваемого слоя (от 20 до 70 м) отмечаются летом. Такое явление характерно для периода сильных апвеллингов на юго-восточном побережье Крыма, способствующих подъему холодного промежуточного слоя, оно связано также с сезонным прогревом поверхности моря. Оба этих процесса в совокупности приводят к устойчивому сезонному термоклин. Такие условия

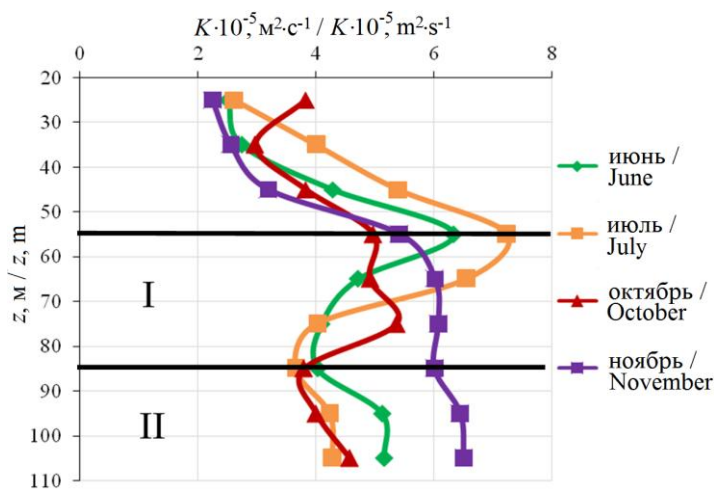


Рис. 5. Сезонная изменчивость осредненного коэффициента вертикальной турбулентной диффузии K в заданных интервалах глубин по данным зондирования, полученным в разные сезоны. Каждая точка показывает среднее значение коэффициента в десятиметровом слое

Fig. 5. Seasonal variability of the averaged vertical turbulent diffusion coefficient K at specified depth intervals according to sounding data obtained in different seasons. Each point shows the average value of the coefficient in a ten-meter layer

стратификации при достаточной интенсивности воздействия на него верхнего перемешанного слоя способствуют поддержанию турбулентного обмена за счет формирования и опрокидывания внутренних волн на их границе. Максимальные значения коэффициента в нижней части рассматриваемого слоя (от 70 до 110 м) наблюдаются в конце осени, что можно объяснить ослаблением термоклина, его опусканием и заглужением верхнего сильно перемешанного слоя в данном районе в связи с сезонным увеличением средней скорости ветра и ослаблением потока солнечной коротковолновой радиации [11].

Сравнивая эти графики с модельным распределением $K(z)$, полученным в работе [9] (рис. 6), можно увидеть, что они не противоречат друг другу. Более того, изменение коэффициента с глубиной за летний период в слое глубин от 50 до 110 м показывает очень хорошее согласование с результатами полуэмпирической модели Черного моря, однако коэффициент в исследуемом участке принимает большие значения.

Можно также отметить явную обратно пропорциональную зависимость коэффициента K от глубины в интервале от 50 до 70 м (область I на рис. 5 и 6) и прямо пропорциональную в интервале от 70 до 110 м (область II на рис. 5 и 6). Это свидетельствует о преобладании в слоях разного рода физических механизмов перемешивания. Так, в области I существенный вклад в турбулентный обмен могут вносить как обрушивающиеся внутренние волны, вызванные возмущениями верхнего деятельного слоя, так и квазиинерционные внутренние волны вследствие локального обрушения волн и формирования турбулентных пятен [12]. Область II представляет собой верхнюю сильно стратифицированную часть основного пикноклина, где вертикальный турбулентный обмен формируется вследствие сдвиговой неустойчивости квазигоризонтальных течений квазиинерционных внутренних волн

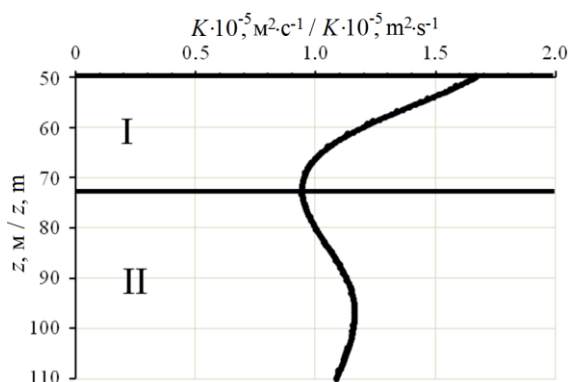


Рис. 6. 1.5D-модельное распределение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии K с глубиной в глубоководной области Черного моря по осредненным данным [9] для рассматриваемого в данной работе диапазона глубин

Fig. 6. 1.5D-model depth distribution of the vertical turbulent diffusion coefficient in the deep-water area of the Black Sea according to the averaged data [9] for the depth range considered in this paper

в стратифицированной жидкости. Стоит также отметить, что по мере приближения к зимнему периоду коэффициент K с глубиной меняется меньше и уже в ноябре меняет в области I свою зависимость на прямопропорциональную, свидетельствующую о сезонной смене гидрологического режима.

Выводы

По результатам измерений зондирующего комплекса «Сигма-1» были получены зависимости коэффициента вертикальной турбулентной диффузии K от частоты плавучести N . Степени четырех степенных аппроксимаций зависимостей $K \cong A \cdot N^\alpha$ близки друг к другу и приблизительно равны $\alpha \approx -1$, в то время как значения коэффициента заметно различаются для всех месяцев. Степени приведенных аппроксимаций показывают хорошую сходимость с $1.5D$ -модельными для данных за осенние и летние периоды, полученных в разные годы, однако значения коэффициента различаются на два порядка. Одной из причин такого различия можно считать особый гидрологический режим и дополнительные факторы, присущие прикерченскому участку шельфа и его склону. Этот участок находится в зоне действия антициклонических вихрей и имеет зону резкого изменения наклона дна. Такие условия способствуют локальному увеличению средней интенсивности квазиинерционных внутренних волн, вносящих наибольший вклад в вертикальный турбулентный обмен. Второй причиной, которую бы хотелось отметить, является то, что в исследуемый слой моря, описанный одной аппроксимирующей зависимостью $K(N)$, входят несколько условных областей явного возрастания и убывания коэффициента K с глубиной. И, судя по полученным графикам зависимостей $K(z)$, можно сказать, что этим областям будут присущи свои условия стратификации и гидрофизические явления, способствующие формированию в них турбулентных пятен.

Проведенный анализ данных измерений позволяет оценивать и использовать коэффициент вертикальной турбулентной диффузии в зависимости от стратификации и глубины для оценок вертикальных потоков тепла, соли и других растворенных химических и биологических веществ в исследованном регионе Черного моря для различных сезонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wunsch C., Ferrari R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans // Annual Review of Fluid Mechanics. 2004. Vol. 36. P. 281–314. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122121>
2. Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря / А. С. Самодуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 5. С. 60–71.
3. Samodurov A. S., Ivanov L. I. Mixing and energy dissipation rate in Mediterranean seas: an intercomparison of existing models // Proceeding of the “Second International Conference on Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea: Similarities and differences of two interconnected basins”. Ankara : Tübitak Publishers, 2003. P. 369–375.
4. Самодуров А. С., Любицкий А. А., Пантелеев Н. А. Вклад опрокидывающихся внутренних волн в структурообразование, диссипацию энергии и вертикальную диффузию в океане // Морской гидрофизический журнал. 1994. № 3. С. 14–27.

5. *Gregg M. C.* Variations in the intensity of small-scale mixing in the main thermocline // *Journal of Physical Oceanography*. 1977. Vol. 7, № 3. P. 436–454. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1977\)007<0436:VITIOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1977)007<0436:VITIOS>2.0.CO;2)
6. *McEwen A. D.* The kinematics of stratified mixing through internal wavebreaking // *Journal of Fluid Mechanics*. 1983. Vol. 128. P. 47–57. doi:10.1017/S0022112083000373
7. *Osborn T. R.* Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements // *Journal of Physical Oceanography*. 1980. Vol. 10, iss. 1. P. 83–89. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010<0083:EOTLRO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<0083:EOTLRO>2.0.CO;2)
8. *Gregg M. C.* Scaling turbulent dissipation in the thermocline // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1989. Vol. 94, iss. C7. P. 9686–9698. doi:10.1029/JC094iC07p09686
9. *Самодуров А. С.* Взаимодополняемость различных подходов для оценки интенсивности вертикального турбулентного обмена в естественных стратифицированных бассейнах // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 37–48. doi:10.22449/0233-7584-2016-6-37-48
10. Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием / А. Г. Зацепин [и др.] // *Современные проблемы динамики океана и атмосферы: сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П. С. Линейкина* / Под ред. А. В. Фролова, Ю. Д. Реснянского. М. : Триада, 2010. С. 347–368.
11. Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием / А. А. Кубряков [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 449–468. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-449-468
12. *Munk W.* Internal waves and small-scale processes // *Evolution of Physical Oceanography* / B. A. Warren, C. Wunsch (eds). MIT Press, 1981. P. 264–291.

Об авторах:

Казakov Дмитрий Анатольевич, младший научный сотрудник, аспирант, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-5083-4968**, engineer.dk@mail.ru

Самодуров Анатолий Сергеевич, главный научный сотрудник, заведующий отделом турбулентности, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9910-5325**, anatol_samodurov@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Казakov Дмитрий Анатольевич – формулировка и постановка задачи исследования, обработка и анализ данных, подготовка текста статьи

Самодуров Анатолий Сергеевич – разработка концепции, разработка математической модели

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Wunsch, C. and Ferrari, R., 2004. Vertical Mixing, Energy, and the General Circulation of the Oceans. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36, pp. 281–314. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122121>
2. Samodurov, A.S., Dykman, V.Z., Barabash, V.A., Efremov, O.I., Zubov, A.G., Pavlenko, O.I. and Chukharev, A.M., 2005. “Sigma-1” Measuring Complex for

the Investigation of Small-Scale Characteristics of Hydrophysical Fields in the Upper Layer of the Sea. *Physical Oceanography*, 15(5), pp. 311–322. doi:10.1007/s11110-006-0005-1

3. Samodurov, A.S. and Ivanov, L.I., 2003. Mixing and Energy Dissipation Rate in Mediterranean Seas: an Intercomparison of Existing Models. In: A. Yilmaz, Ed., 2003. *Proceeding of the "Second International Conference on Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea: Similarities and Differences of Two Inter-connected Basins"*. Ankara : Tübitak Publishers, 2003. P. 369–375.
4. Samodurov, A.S., Lubitsky, A.A. and Panteleev, N.A., 1995. Contribution of Breaking Internal Waves to Structure Formation, Energy Dissipation, and Vertical Diffusion in the Ocean. *Physical Oceanography*, 6(3), pp. 177–190. <https://doi.org/10.1007/BF02197516>
5. Gregg, M.C., 1977. Variations in the Intensity of Small-Scale Mixing in the Main Thermocline. *Journal of Physical Oceanography*, 7(3), pp. 436–454. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1977\)007<0436:VITIOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1977)007<0436:VITIOS>2.0.CO;2)
6. McEwan, A.D., 1983. The Kinematics of Stratified Mixing Through Internal Wave-breaking. *Journal of Fluid Mechanics*, 128, pp. 47–57. doi:10.1017/S0022112083000373
7. Osborn, T.R., 1980. Estimates of the Local Rate of Vertical Diffusion from Dissipation Measurements. *Journal of Physical Oceanography*, 10(1), pp. 83–89. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010<0083:EOTLRO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<0083:EOTLRO>2.0.CO;2)
8. Gregg, M., 1989. Scaling Turbulent Dissipation in the Thermocline. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C7), pp. 9686–9698. doi:10.1029/JC094iC07p09686
9. Samodurov, A.S., 2016. Complimentarity of Different Approaches for Assessing Vertical Turbulent Exchange Intensity in Natural Stratified Basins. *Physical Oceanography*, (6), pp. 32–42. doi:10.22449/1573-160X-2016-6-32-42
10. Zatsepin, A.G., Kremenetskiy, V.V., Stanichny, S.V. and Burdyugov, V.M., 2010. Black Sea Basin-Scale Circulation and Mesoscale Dynamics under Wind Forcing. In: A. V. Frolov and Yu. D. Resnyansky, 2010. *Modern Problems of Ocean and Atmosphere Dynamics: The Pavel S. Lineykin memorial volume*. Moscow: TRIADA LTD, pp. 347–368 (in Russian).
11. Kubryakov, A.A., Belokopytov, V.N., Zatsepin, A.G., Stanichny, S.V. and Piotukh, V.B., 2019. The Black Sea Mixed Layer Depth Variability and Its Relation to the Basin Dynamics and Atmospheric Forcing. *Physical Oceanography*, 26(5), pp. 397–413. doi:10.22449/1573-160X-2019-5-397-413
12. Munk, W., 1981. Internal Waves and Small-Scale Processes. In: B. A. Warren and C. Wunsch, Eds., 1981. *Evolution of Physical Oceanography*. MIT Press, pp. 264–291.

About the authors:

Dmitrii A. Kazakov, Junior Research Associate, postgraduate student, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-5083-4968**, engineer.dk@mail.ru

Anatoly S. Samodurov, Chief Research Associate, Head of Turbulence Department, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-9910-5325**, anatol_samodurov@mail.ru

Contribution of the authors:

Dmitrii A. Kazakov – research task setting, data processing and analysis, article composition

Anatoly S. Samodurov – concept development, mathematical model development

All the authors have read and approved the final manuscript.