

А.С. Самодуров, Л.В. Глобина

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

**ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ДИССИПАЦИИ
ТУРБУЛЕНТНОЙ ЭНЕРГИИ ОТ СТРАТИФИКАЦИИ
НА КОНТИНЕНТАЛЬНОМ СКЛОНЕ И ШЕЛЬФЕ**

Анализируются результаты измерений скорости диссипации турбулентной энергии и распределения частоты плавучести с глубиной на шельфе и континентальном склоне для различных районов океана, приведенные в литературе. По данным измерений исследуется характер зависимости диссипации турбулентной энергии ε от частоты плавучести N в верхнем стратифицированном слое с целью проверки предложенных к настоящему времени моделей вертикального обмена в стратифицированных бассейнах за счет сдвиговой неустойчивости в поле инерционно-гравитационных внутренних волн. Отметим, что здесь не анализируется уровень скорости диссипации энергии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *внутренние волны, сдвиговая неустойчивость, вертикальное перемешивание, диссипация энергии, шельф, континентальный склон.*

В литературе имеется немало примеров прямых и косвенных расчетов распределений скорости диссипации турбулентной энергии и связанного с ней коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по глубине. Эта информация необходима для оценок интенсивности вертикального обмена теплом и растворенными химическими веществами, а также его изменчивости в зависимости от изменяющихся внешних условий.

По различным оценкам ключевым механизмом для поддержания перемешивания и вертикального обмена в основной толще стратифицированной части природных бассейнов служит механизм сдвиговой неустойчивости в поле квазиинерционных внутренних волн, представляющих собой почти горизонтальные стратифицированные периодические по глубине сдвиговые течения [1, 2].

Поскольку прямые измерения скорости диссипации энергии или коэффициента вертикальной диффузии связаны, как правило, с определенными трудностями, возникает необходимость построения сравнительно простых моделей исследуемых процессов с использованием, в данном случае, спектральных моделей для внутренних волн в океане. Основным параметром внешней среды в этих моделях рассматривается частота Вайсяля-Брента, или частота плавучести, $N = \sqrt{(g / \rho_0)(\partial\rho / \partial z)}$, где ρ – среднее распределение плотности жидкости по глубине, g – ускорение свободного падения, ρ_0 – характерная плотность жидкости в слое, z – вертикальная координата. В наиболее известной модели такого рода, построенной Грэггом в работе [2], в качестве основы используется модель климатического спектра Гаррета и Манка [3], а также подход к проблеме, предложенный в работе [4]. В итоге модельная степенная зависимость $\varepsilon(N)$ имеет вид

$$\varepsilon \approx N^2. \quad (1)$$

Следует особо подчеркнуть, что полученная зависимость предлагается для описания всего стратифицированного слоя, начиная с максимума частоты плавучести в верхнем стратифицированном слое. В нашей работе [5] разработана альтернативная модель для описания зависимости $\varepsilon(N)$, в которой предлагаются отличающиеся друг от друга зависимости для главного пикноклина

$$\varepsilon \approx N^3, \quad (2)$$

и для верхнего стратифицированного слоя

$$\varepsilon \approx N^3 |\partial N / \partial z|^{-1}. \quad (3)$$

При этом во всех полуэмпирических моделях (моделях, основанных на анализе данных измерений) для главного пикноклина, которые привлекались для сравнения результатов [6 – 8], зависимость ε от N в целом соответствовала соотношению (2). Для двух результатов в верхнем стратифицированном слое [9, 10], результат оказался $\varepsilon \approx N$, что также заметно отличается от зависимости (1) (к сожалению, сравнению с моделью (3) помешало отсутствие соответствующих распределений $N(z)$).

В представленной работе проводится анализ результатов измерений скорости диссипации турбулентной энергии в верхнем стратифицированном слое для различных районов естественных бассейнов и их сравнение с модельными распределениями $\varepsilon(N)$ из [5]. Следует сказать, что указанная модель, так же как и другие модели подобного рода, предназначена для описания средних условий в районах, где преобладающим фактором вертикального турбулентного обмена служит механизм сдвиговой неустойчивости в поле инерционно-гравитационных внутренних волн.

Модельные распределения исследуемых характеристик в данной работе восстанавливались следующим путем. Модельное распределение $N(z)$ получалось с помощью процедуры аппроксимации измеренного распределения степенной функцией $N \approx 1/z^\alpha$ (откуда $z \approx 1/N^{1/\alpha}$) с использованием метода наименьших квадратов. После этого модуль производной частоты плавучести по вертикальной координате можно выразить через N соотношением

$$|\partial N / \partial z| \approx N^{\frac{\alpha+1}{\alpha}}. \quad (4)$$

Подставляя это выражение в (3), получаем искомую модельную зависимость $\varepsilon(N)$

$$\varepsilon \approx N^\beta = N^{2-1/\alpha}. \quad (5)$$

Укажем, что во всех рассматриваемых экспериментальных работах, для вычисления скорости диссипации энергии на единицу массы использовалось следующее соотношение:

$$\varepsilon = 7,5 \cdot \nu \cdot \langle u_z'^2 \rangle \text{ Вт/кг}, \quad (6)$$

где ν – молекулярная вязкость морской воды, $\langle u_z'^2 \rangle$ – осредненный квадрат вертикального сдвига мелкомасштабных флуктуаций горизонтальной скорости.

В процессе анализа данных измерений, ряды данных измерений для частоты плавучести и скорости диссипации энергии восстанавливались пу-

тем оцифровки графиков, приведенных в рассматриваемых статьях, с помощью имеющегося для этих целей программного обеспечения. Для сравнения с модельными распределениями, экспериментально полученные распределения $\varepsilon(N)$ подвергались процедуре аппроксимации степенной функцией методом наименьших квадратов.

Ниже приводятся результаты анализа данных измерений в различных районах Мирового океана.

Используемые данные измерений

California slope [2]. Представленные в работе исследования проводились в рамках проекта *PATCHEX (The Patch Experiment)*¹ на ряде станций, находящихся на расстоянии не более 10 км друг от друга. Измерения проводились с использованием зонда *Multi-Scale Profiler (MSP)* в октябре 1986 г. в западной части калифорнийского течения. В работе приведены результаты расчета скорости диссипации турбулентной энергии, осредненной по 28 зондированиям *MSP*, и частоты плавучести в зависимости от глубины (см. рис. 1). Автор отмечает наличие термохалинных интрузий, наблюдаемых во время измерений. Здесь мы анализируем интервал глубин от 70 до 268 м.

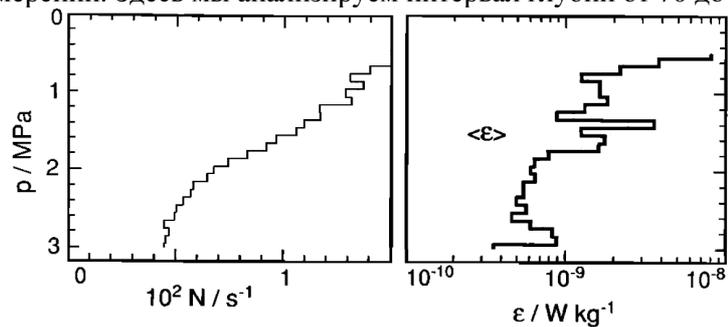


Рис. 1. Осредненный профиль частоты плавучести и скорости диссипации турбулентной энергии в зависимости от глубины, по данным *PATCHEX* [2].

Svalbard continental slope [11]. В статье рассматриваются данные станции *FSD2*, расположенной на западной стороне плато Ермак северного шельфа острова Шпицберген. Это открытый шельфовый район. С восточной стороны на него оказывает влияние Западное Шпицбергенское течение, которое несет с собой теплые и соленые воды Арктического океана. С запада он испытывает воздействие холодного, менее соленого Восточного Гренландского Течения. На севере от станции начинается граница льда. Для измерений использовались микроструктурные зонды *MSS*. Всего на станции *FSD2* было проведено 26 зондирований. Осредненные данные представлены на рис. 2. Мы рассматриваем диапазон глубин от 22 до 54 м, который не попадает в область шума измерительной аппаратуры.

Virginia continental slope [12]. В работе исследуются турбулентные процессы в западной части Атлантического океана в стратифицированном слое в области континентального склона Виржинии, Нью-Йоркской бухты, с достаточно крутым склоном без выраженной зоны перехода. Невдалеке от бухты проходит течение Гольфстрим. Для измерения данных наблюдений тонкой структуры и микроструктуры использовался зонд высокого разрешения *High-*

Resolution Profiler (HRP), с помощью которого было получено 245 профилей, расположенных вдоль склона. В нашей работе мы используем данные станции А (рис. 3), расположенной западнее течения Гольфстрим, в диапазоне глубин от 172 до 493 м. Этот выбор объясняется тем, что только для этой станции в статье приведены необходимые для анализа рисунки.

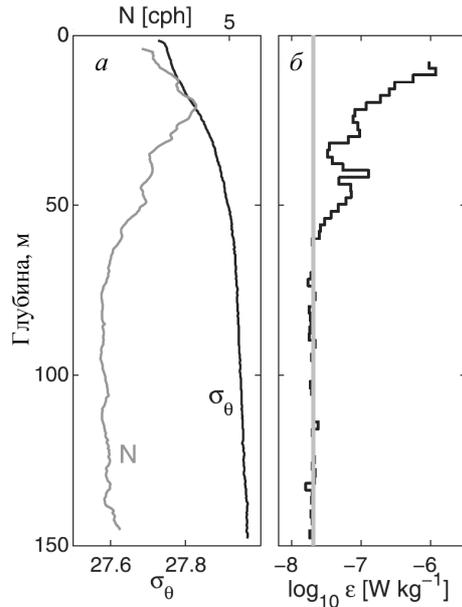


Рис. 2. Осредненные профили условной плотности и частоты плавучести (а) и скорости диссипации турбулентной энергии (б) в зависимости от глубины, для станции FSD2, континентальный склон острова Шпицберген [11].

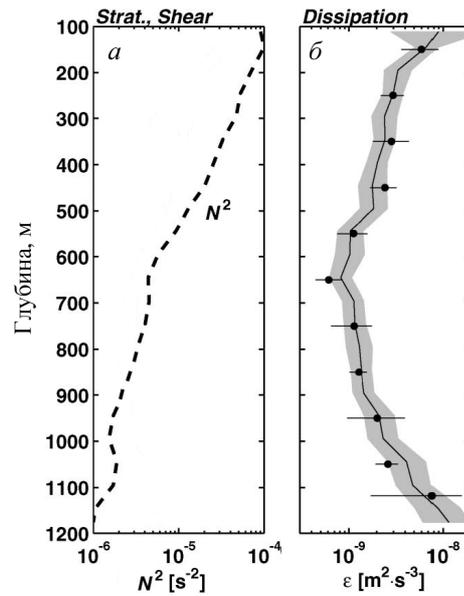


Рис. 3. Осредненные вертикальные профили частоты плавучести (а) и скорости диссипации энергии (б) на континентальном склоне Вирджинии [12].

Svalbard shelf [13]. Исследования проводились северо-западнее острова Шпицберген на подводном плато Ермак. Граница ледовой зоны Арктического фронта располагалась северо-западнее острова. Измерения скорости диссипации турбулентной энергии проводились на пяти станциях, первые три из которых располагались непосредственно на ледовой границе, и две – ближе к острову. 185 профилей было получено с использованием зондирующего комплекса *SeaBird Electronics (SBE911plus)*. Для небольших глубин использовался свободно закрепленный зонд *MSS90L (MSS)*, которым было произведено 222 зондирования. Авторы отмечают, что наличие достаточно сильной стратификации в приповерхностном слое из-за влияния холодного фронта ледовой границы ослабляет перемешивание через пикноклин. В нашей статье мы рассматриваем данные станции 4 (см. рис. 4) в диапазоне глубин от 122 до 200 м. Формально эта станция не попадает под влияние льда и находится в зоне действия теплого Западного Шпицбергенского течения, которое сохраняет температуру $6\ ^\circ C$ на глубине 3 м и $5\ ^\circ C$ на глубине 100 м от поверхности, тогда как температура на

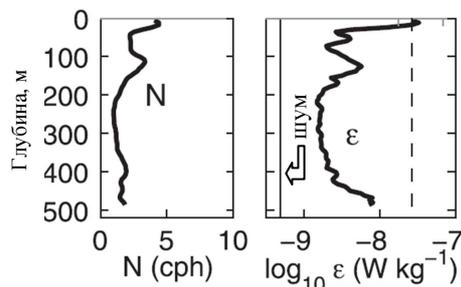


Рис. 4. Осредненный профиль частоты плавучести N и скорости диссипации турбулентной энергии ε в зависимости от глубины, для станции 4 на подводном плато Ермак [13].

осредненные профили частоты плавучести и скорости диссипации турбулентной энергии (см. рис. 5) в диапазоне глубин от 21 до 33 м от поверхности (на графике глубина отсчитывается от дна).

Baltic shelf sea [15]. В данной работе описываются данные измерений скорости диссипации энергии, которые проводились в зимнее время на Балтийском шельфе, в районе восточной оконечности острова Готланд. Район измерений характеризовался довольно глубоким перемешанным слоем (около 60 м), формировавшимся, как указывают авторы, за счет интенсивного ветрового воздействия. Скорость ветра достигала здесь более 14 м/с. Выделено два различных режима генерации мелкомасштабной турбулентности: интенсивное перемешивание в приповерхностном слое над халоклином, которое определяется ветровым воздействием, и сравнительно слабое перемешивание в области халоклина. Измерения проводились с использованием зонда *MSS*. Данные измерений представлены на рис. 6. Мы анализировали верхний стратифицированный слой в диапазоне глубин от 64 до 75 м.

Yermak Plateau [16]. Представленные в работе исследования проводились в рамках проекта *CEAREX* (*Coordinated Eastern Arctic Experiment*), в марте – апреле 1989 г. Измерения проводились на северной оконечности плато Ермак в восточной части Арктического океана с плавучего ледового основания. Технические характеристики аппаратуры детально обсуждаются в работе [17]. Мик-

станциях 2 и 5 опускается ниже нуля и измерение скорости диссипации энергии ниже 150 м попадает в область шума измерительной аппаратуры.

England shelf sea [14]. В статье исследуются процессы перемешивания на западном шельфе Великобритании, вокруг Ирландии (Северный пролив Св. Георга, Ирландское море, южный шельф Ирландии). Измерения проводились на 8 станциях и были осреднены по 150 профилям, полученным с использованием свободно падающего зонда *FLY*. Мы рассматриваем осред-

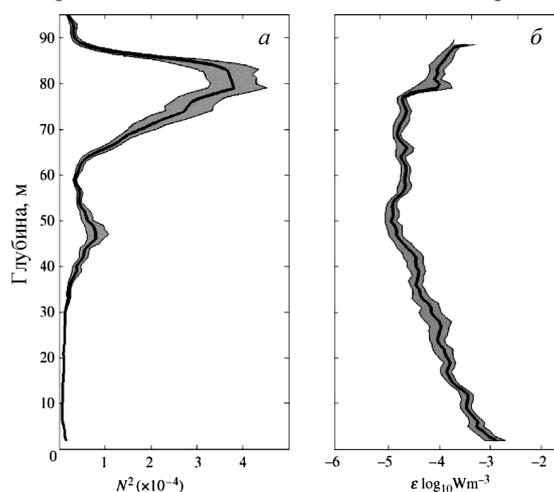


Рис. 5. Осредненный профиль квадрата частоты плавучести (а) и скорости диссипации турбулентной энергии (б) в зависимости от глубины, для измерений на шельфе Великобритании [14].

роструктурные данные были получены с использованием зонда *Rapid Sampling Vertical Profiler (RSVP)*. Распределения скорости диссипации энергии и частоты плавучести (см. рис. 7) были осреднены по 1 500 зондированиям с частотой 2 – 3 профиля в час. Мы использовали интервал глубин от 160 до 280 м.

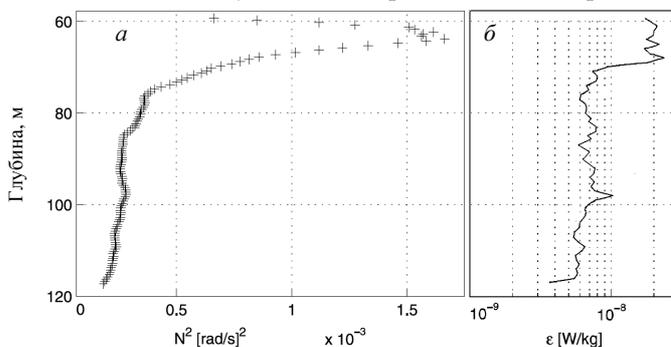


Рис. 6. Осредненные профили частоты плавучести (а) и скорости диссипации турбулентной энергии (б) в зависимости от глубины для шельфа Балтийского моря [15].

Рис. 7. Осредненные профили частоты плавучести (■) и скорости диссипации турбулентной энергии (○) в зависимости от глубины для плато Ермак [16].

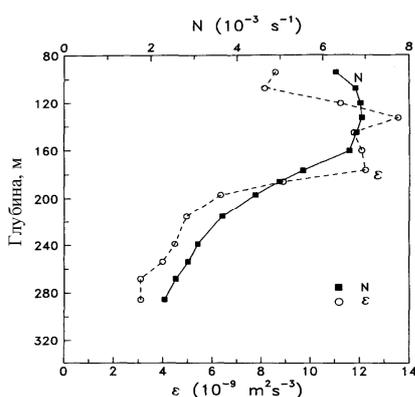


Рис. 7. Осредненные профили частоты плавучести (■) и скорости диссипации турбулентной энергии (○) в зависимости от глубины для плато Ермак [16].

Краткий обзор результатов. Результаты анализа данных измерений, а также модельные распределения $\epsilon(N)$ на их основе собраны в таблице.

Прежде всего, отметим, что несмотря на разнообразие гидрологических и гидродинамических условий, в которых проводились измерения, и, как следствие, различие, например, в распределении частоты плавучести по глубине (степень при z , как видно из таблицы, изменяется в пределах от 0,83 до 5), наблюдается в целом удовлетворительное соответствие между измеренными и модельными распределениями скорости диссипации энергии от частоты плавучести. Наблюдаемое соответствие в шельфовых зонах оказалось более близким, чем в областях над континентальным склоном.

Что касается предложенной в модели Грэгга [2] зависимости $\epsilon \approx N^2$, которая должна выполняться во всем стратифицированном водном столбе, включая верхний стратифицированный слой, данные измерений (так же как и модельные распределения) демонстрируют заметное различие в зависимостях $\epsilon(N)$. Интервалы значений степени при N , соответственно для измерений и модели, составляют 0,8 – 1,8 и 0,91 – 1,86. При этом максимальное модельное значение степени β (которое согласно соотношению (5) достигается при больших значениях параметра α) равно двум, что формально соответствует значению этого параметра в модели Грэгга.

Изложенные выше результаты демонстрирует рис. 8, на котором представлена зависимость степени при N в выражении $\epsilon \approx N^\beta$ от степени при z в выражении $N \approx 1/z^\alpha$ по результатам измерений (см. таблицу).

Таблица. Зависимость скорости диссипации энергии ε от частоты плавучести N и зависимость частоты плавучести N от глубины по данным измерений (второй и третий столбцы); зависимость $\varepsilon(N)$ по нашей модели [5] с использованием измеренных распределений $N(z)$ (четвертый столбец).

Источник данных измерений	Измерения $\varepsilon \sim$	Измерения $N \sim$	Модель $\varepsilon \sim$
1	2	3	4
1. California slope [2]	$N^{1,21}$	$z^{-1,0}$	$N^{1,0}$
2. Svalbard continental slope [11]	$N^{1,14}$	$z^{-0,83}$	$N^{0,8}$
3. Virginia continental slope [12]	$N^{0,91}$	$z^{-0,90}$	$N^{0,89}$
4. Svalbard shelf, station 4 [13]	$N^{1,43}$	$z^{-1,88}$	$N^{1,47}$
5. England shelf sea [14]	$N^{1,68}$	$z^{-3,33}$	$N^{1,7}$
6. Baltic shelf sea [15]	$N^{1,86}$	$z^{-5,0}$	$N^{1,8}$
7. Yermak Plateau (shelf) [16]	$N^{1,43}$	$z^{-1,81}$	$N^{1,45}$

На рис. 8 приведена также соответствующая кривая для нашей модельной зависимости $\beta(\alpha)$ в условиях верхнего стратифицированного слоя (5).

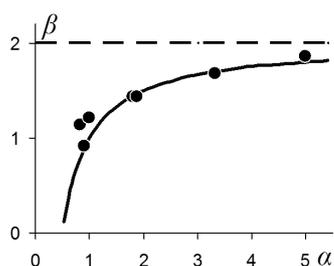


Рис. 8. Сравнение модельной зависимости $\beta(\alpha)$ (—) с результатами проанализированных данных натуральных измерений (•).

На основе анализа, проведенного в работе, можно сделать вывод о том, что зависимости скорости диссипации энергии от частоты плавучести, которые были рассчитаны по данным натуральных измерений в различных районах океана, хорошо соответствуют предложенной нами модели [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wunsch C., Ferrari R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the ocean // Annu. Rev. Fluid Mech. – 2004. – vol. 36. – P. 281-314.
2. Gregg M.C. Scaling turbulence dissipation in the thermocline // J. Geophys. Res. – 1989. – vol. 94, № C7. – С. 9686-9698.
3. Garrett C., Munk W. Space time scales of internal waves // Geophys. Fluid Dyn. – 1972. – vol. 3, № 3. – P. 225-264.
4. Henyey F.S., Wright J., Flatte S.M. Energy and action flow through the internal wave field: An eikonal approach // J. Geophys. Res. – 1986. – vol. 91, № C7. – P. 8487-8495.
5. Самодуров А.С., Глобина Л.В. Диссипация энергии и вертикальный обмен в стратифицированных бассейнах за счет сдвиговой неустойчивости в поле квазиинерционных внутренних волн // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 6. – С. 45-52.
6. Polzin K. Statistics of the Richardson Number: mixing models and finestructure // J. Phys. Oceanogr. – 1996. – 11. – P. 1409-1425.
7. Ferron B., Mercier H., Speer K.G., Garrett A.E., Polzin K.L. Mixing in the Romanche fracture zone // J. Phys. Oceanogr. – 1998. – vol. 28. – P. 1929-1945.

8. *Kunze E., Williams III, Briscoe M.G.* Observations of shear and vertical stability from a neutrally buoyant float // *J. Geophys. Res.* – 1990. – vol. 95, № C10. – P. 18127-18142.
9. *Gargett A.E., Holloway G.* Dissipation and diffusion by internal wave breaking // *J. Marine Research.* – 1984. – vol. 42, № 1. – P. 15-27.
10. *Самодуров А.С., Любичкий А.А., Пантелеев Н.А.* Вклад опрокидывающих внутренних волн в структурообразование, диссипацию энергии и вертикальную диффузию в океане // *Морской гидрофизический журнал.* – 1994. – № 3. – С. 14-27.
11. *Sirevaag A., Fer I.* Early spring oceanic heat fluxes and mixing observed from drift stations North of Svalbard // *J. Phys. Oceanogr.* – 2009. – vol. 39. – P. 3049-3069.
12. *Nash J.D., Kunze E., Toole J.M., Schmitt R.W.* Internal tide reflection and turbulent mixing on the continental slope // *J. Phys. Oceanogr.* – 2004. – vol. 34. – P. 1117-1134.
13. *Fer I., Skogseth R., Geyer F.* Internal waves and mixing in the marginal ice zone near the Yermak Plateau // *J. Phys. Oceanogr.* – 2010. – vol. 40. – P. 1613-1630.
14. *Rippeth T.P.* Mixing in seasonally stratified shelf seas: a shifting paradigm // *Phil. Trans. R. Soc. A.* – 2005. – vol. 363, № 1873. – P. 2837-2854.
15. *Lass H.U., Prandke H., Liljebladh B.* Dissipation in the Baltic proper during winter stratification // *J. Geophys. Res.* – 2003. – vol. 108, № C6. 3187, doi: 10.1029/2002JC001401.
16. *Wijesekera H., Padman L., Dillon T., Levine M., Paulson C., Pinkel R.* The application of internal-wave dissipation models to region of strong mixing // *J. Phys. Oceanogr.* – 1993. – vol. 23. – P. 269-286.
17. *Padman L., Dillon T.M.* Turbulent mixing near the Yermak Plateau during CEAREX // *J. Geophys. Res.* – 1993. – vol. 96. – P. 4769-4782.

Материал поступил в редакцию 13.10.2011 г.

АНОТАЦІЯ Аналізуються результати вимірів швидкості дисипації турбулентної енергії ε і профілю частоти плавучості на шельфі і континентальному схилі для різних районів океану, приведені в літературі. За даними вимірів досліджується характер залежності дисипації турбулентної енергії від частоти плавучості N у верхньому стратифікованому шарі з метою перевірки запропонованих до теперішнього часу моделей вертикального обміну в стратифікованих басейнах за рахунок сдвігової нестійкості в полі інерційно-гравітаційних внутрішніх хвиль. Відзначимо, що тут не аналізується рівень швидкості дисипації енергії.

ABSTRACT Described in literature results of measurements of turbulent kinetic energy (TKE) dissipation rate, ε , and buoyancy frequency, N , profiles collected in several continental shelves and slopes for various ocean areas are analyzed in this paper. The dependence of the TKE dissipation rate on buoyancy frequency is analyzed for verification of suggested to date models of vertical exchange in stratified basins arises due to shear instability in the internal-gravity internal wave field. It should be mentioned that the level of the TKE dissipation rate is not analyzed here.

¹ Комплексный эксперимент, выполненный в период с 8 по 27 октября 1986 г. в Северной части Тихого океана в окрестности точки с координатами 34 с.ш. и 127 в.д. с использованием нескольких судов и буйковых систем.