

10. Воеводин В. Н. Роль магматизма в формировании вольфрамового оруденения Тихоокеанских подвижных областей // Тихоокеан. геология. – 1982. – № 2. – С. 13–22.
11. Воеводин В. Н. Принципы рудноформационного анализа и генетическая классификация эндогенного вольфрамового оруденения // Сов. геология. – 1982. – № 4. – С. 34–48.

Харьковский национальный университет
им. В. Н. Каразина

Поступило в редакцию 10.12.2007

УДК 551.465.15

© 2008

Член-корреспондент НАН Украины В. А. Иванов, А. С. Самодуров,
А. М. Чухарев, А. В. Носова

Интенсификация вертикального турбулентного обмена в районах сопряжения шельфа и континентального склона в Черном море

The dependence of the vertical turbulent exchange intensity on the local stratification in stratified layers of the Black Sea near the interface between the shelf and the continental slope is estimated by the data of field measurements. The field experiments were performed within the framework of the international projects GEF/BSERP (May, 2004) and “Black Sea – 2004” (July, 2004) and also the national projects (May, 2007). Information is got with the use of the probing system “Sigma-1” [1]. As a data processing tool, the method [2, 3] of estimation of the vertical turbulent diffusion coefficient depending on external conditions is used. The mean values of the coefficient of turbulent exchange in all explored regions proved to be substantially greater (approximately by one order of magnitude) as compared to that under conditions of the open sea for the identical local stratification. This can be related to a peculiarity of the bottom topography influencing the dynamics of quasiinertial internal waves which serve here as a basic reason of the small-scale mixing and vertical diffusion.

Вертикальный турбулентный обмен в деятельном слое океанов и морей играет важную роль в формировании океанологических полей в водной среде. Постановка и решение экологических проблем и задач прогноза изменения климата океанов и морей за счет естественных и антропогенных воздействий невозможны без детального знания механизмов обмена и расчета потоков тепла и растворенных веществ в естественных бассейнах.

Опыт последних десятилетий в создании и верификации моделей, описывающих процессы обмена, показывает, что для получения полного представления о путях распространения примесей, интенсивности потоков тепла и растворенных химических и биологических веществ [1] необходимы детальные знания и соответствующий учет основных физических механизмов, участвующих в этих процессах.

Вместе с тем построение адекватных теоретических и полуэмпирических моделей вертикального турбулентного обмена чаще всего невозможно без детального исследования особенностей тонкой структуры и микроструктуры гидрофизических полей в различных физико-географических условиях, что, в свою очередь, позволяет выявить физические механизмы, определяющие основной вклад в обмен.

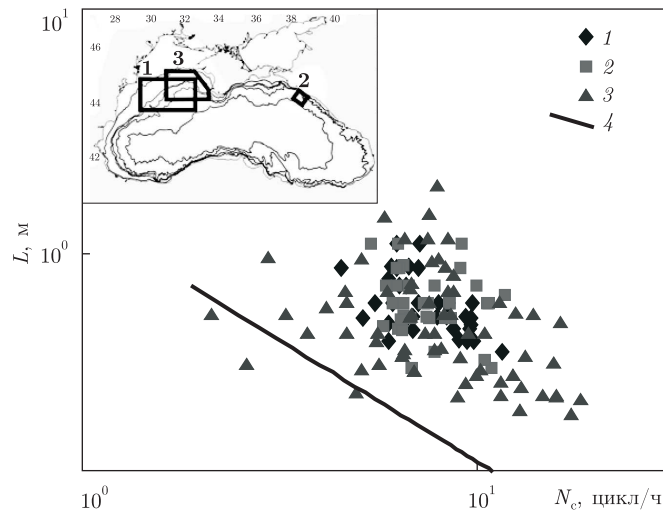


Рис. 1. Экспериментальная зависимость вертикального масштаба турбулентных пятен L от локальной стратификации N_s в зоне сопряжения шельфа и континентального склона Черного моря по данным измерений (см. *врезку*) на полигонах **1**, **2**, **3** (соответствующих условным обозначениям *1*, *2*, *3*). Сплошная линия (*4*) — средняя эмпирическая зависимость (*1*), полученная по данным измерений в верхнем термоклинне глубоководной области Индийского океана [2]

Оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии и скорости диссипации энергии в исследуемых районах. Натурные данные о тонкой структуре и микроструктуре гидрофизических полей в зоне сопряжения шельфа и континентального склона Черного моря были собраны в трех экспедициях. Два массива данных зондирований получены соответственно в мае и июле 2004 г. во время экспедиций на НИС “Академик” Болгарской АН в северо-западной части моря (*врезка* на рис. 1, полигон **1**) в рамках проекта GEF/BSERP и на НИС “Акванавт” (Южное отделение Института океанологии РАН) в северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджик в рамках проекта “Черное море — 2004” при научно-техническом сотрудничестве с Институтом океанологии РАН. Исследования проводились на двух полигонах размером приблизительно 6×5 миль, расположенных севернее и южнее Геленджикской бухты (см. *врезку*, полигон **2**). Во время третьей экспедиции в мае 2007 г. был собран третий массив данных в рамках национальных проектов на судне “Эксперимент” (см. *врезку*, полигон **3**).

Всего было выполнено около 150 зондирований. В качестве измерительного средства использован разработанный в Морском гидрофизическом институте НАН Украины зонд-турбулиметр “Сигма-1”, который удовлетворяет необходимым требованиям по точности и чувствительности и предназначен для исследования гидрофизических полей в верхнем 100-метровом слое океана [3].

Все результаты измерений собраны в близких физико-географических условиях, что позволяет анализировать их совместно. Основной целью анализа данных было определение вклада процессов, осуществляющих перемешивание и вертикальный обмен в верхнем стратифицированном слое моря, чтобы получить оценки скорости диссипации турбулентной кинетической энергии и коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии.

Достижение поставленной задачи потребовало привлечения созданной ранее методики расчетов [2, 4], суть которой состоит в следующем. Исследованиями показано, что в основной толще устойчиво стратифицированного океана, в удалении от резких фронтальных

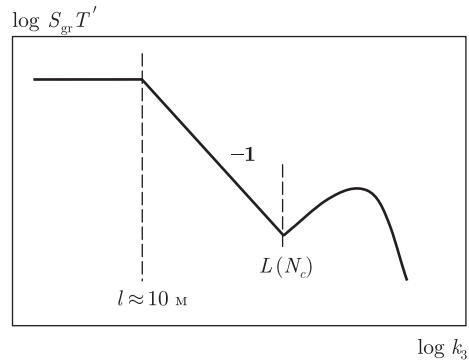


Рис. 2. Схематическая форма спектра флуктуаций вертикального градиента температуры в зависимости от вертикального волнового числа в случае, когда вертикальный обмен осуществляется за счет локальных обрушений в поле внутренних волн [5].

–1 — означает показатель степени при волновом числе k_3

зон и проливов, а также районов, в которых созданы условия для проявления механизма двойной диффузии, главная роль в генерации тонкой структуры и микроструктуры гидрофизических полей принадлежит внутренним волнам [1]. Обратимая тонкая структура формируется собственно волнами, в то время как микроструктура локализуется в турбулентных пятнах, образующихся за счет сдвиговой неустойчивости в поле квазиинерционных (частота близка к инерционной частоте f) внутренних волн. Именно этот механизм при указанных условиях вносит основной вклад в вертикальный турбулентный обмен. При этом спектр вертикальных градиентов температуры показан на рис. 2. Первый участок спектра, $\Lambda > l$, соответствует собственно внутренним волнам; второй участок, $L > \Lambda > l$, формирует волны, теряющие энергию за счет сдвиговой неустойчивости; структуру третьего участка, $\Lambda < L$, определяют флуктуации температуры в турбулентных пятнах, образовавшихся за счет сдвиговой неустойчивости в поле внутренних волн (Λ — длина волны, а L соответствует характерному вертикальному масштабу турбулентных пятен).

С учетом анализа представительного массива данных зондирований в сезонном термоклине океана [2] получена средняя эмпирическая зависимость:

$$L = DN_c^{-1} \text{ м}, \quad [N_c] = \text{цикл} \cdot \text{ч}^{-1}, \quad D \simeq 1,4 \text{ м} \cdot (\text{цикл} \cdot \text{ч}^{-1}). \quad (1)$$

Здесь $N_c = N \cdot (2\pi)^{-1}$ — локальная циклическая частота плавучести, где $N = \sqrt{\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$; ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения; D — коэффициент пропорциональности. Для анализа использовались участки с приблизительно постоянными значениями частоты плавучести. Привлечение энергетического подхода для исследования характеристик перемешанных пятен позволяет получить два искомых соотношения:

$$k \simeq 4,8 \cdot 10^{-5} D^2 N_c^{-1} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad \varepsilon \simeq 4,3 \cdot 10^{-10} D^2 N_c \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}, \quad [N_c] = \text{цикл} \cdot \text{ч}^{-1}, \quad (2)$$

или, для проанализированного массива данных,

$$k \simeq 9,4 \cdot 10^{-5} N_c^{-1} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad \varepsilon \simeq 8,4 \cdot 10^{-10} N_c \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}, \quad (3)$$

где k — коэффициент вертикальной турбулентной диффузии; ε — скорость диссипации энергии.

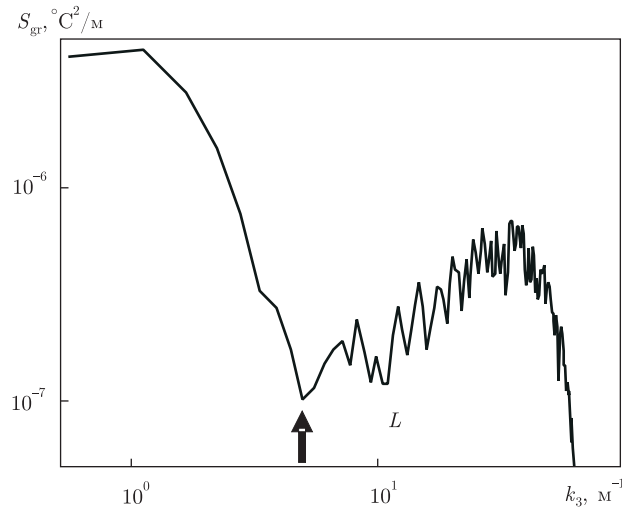


Рис. 3. Расчет вертикального спектра флуктуаций вертикального градиента температуры по данным зондирований в Черном море и выбора характерного вертикального масштаба турбулентных пятен L

Данные, собранные в Черном море, обработаны по изложенной выше методике. Пример расчета спектра вертикальных градиентов температуры приведен на рис. 3. Как видно из рисунка, он структурно соответствует форме спектра на рис. 2, который отражает процессы перераспределения энергии в поле внутренних волн.

Полученный таким образом массив $L(N_c)$ представлен на рис. 1 вместе со средней зависимостью L от N_c (1), рассчитанной для верхнего термоклина открытой части океана. Данные измерений были собраны в сравнительно узком диапазоне масштабов частоты плавучести (менее одной декады), поэтому представляется нецелесообразным аппроксимировать их отдельной степенной зависимостью. В предположении о том, что для обсуждаемых данных степень зависимости L от N_c соответствует “средней”, выражения для искомых величин преобразуем к виду

$$k \simeq 8,4 \cdot 10^{-4} N_c^{-1} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad \varepsilon \simeq 7,6 \cdot 10^{-9} N_c \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}. \quad (4)$$

Сравнение выражений (3) и (4) показывает, что для исследуемых условий значения k и ε почти на порядок величины превышают “средние” значения для условий открытого моря при одинаковых значениях N_c . Формально это связано с тем, что зависимость данных величин от коэффициента D квадратичная, а для двух рассматриваемых случаев его значение отличается приблизительно в три раза (см. рис. 1). Описанный факт выглядит неожиданным.

Приведем численные оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии для двух рассмотренных ситуаций. Полагая значение частоты плавучести 5–10 цикл \cdot ч $^{-1}$ для данного диапазона глубин, получим по порядку величины для открытого моря и зоны сопряжения шельфа и склона соответственно $k \simeq 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ и $k \simeq 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Отметим, что оценка $k \simeq 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ для указанных условий в среднем для Черного моря была ранее получена в работе [6] в рамках обратной задачи, где не привлекались дополнительные гипотезы о физической природе обменных процессов. Последнее подтверждает существование значительных различий в процессах перемешивания в открытой части моря и на его периферии. Средние оценки для скорости диссипации кинетической энергии составляют значения $10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$ и $10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$ соответственно.

Таким образом, чтобы понять причины обнаруженного различия, следует учесть, что обсуждаемые измерения проводились в районе Основного черноморского течения; в северо-западной части моря полигон располагался в зоне действия антициклонического вихря. Оба этих фактора накладывают дополнительный сдвиг скорости на систему течений, создаваемых квазиинерционными внутренними волнами. Это, в свою очередь, должно повышать вероятность возникновения неустойчивости и образования турбулентных пятен в исследуемой системе. Вместе с тем влияние этих факторов вряд ли можно рассматривать как определяющее. Опыт измерений гидрофизических характеристик в зонах интенсивных течений показывает, что осредненные (за вычетом флуктуаций, связанных главным образом с вкладом внутренних волн) значения числа Ричардсона $Ri = N^2/(\partial U/\partial z)^2$, что определяет устойчивость стратифицированного потока, существенно превышают “критическое” значение 0,25. Кроме того, определенное влияние на интенсивность перемешивания и диффузию может оказывать механизм придонного трения на наклонном дне в системе Основного черноморского течения и синоптических вихрей. Однако в работе [7] показано, что вклад придонного трения в вертикальный обмен в среднем существенно меньше по сравнению с вкладом квазиинерционных внутренних волн.

Основной вклад в обмен в области измерений вносят процессы неустойчивости и локального перемешивания в системе квазиинерционных внутренних волн. Главная особенность исследованных районов, наличие зоны резкого изменения наклона дна, может локально повышать среднюю интенсивность квазиинерционных движений вблизи наклонного дна за счет суперпозиции падающих и отраженных (рассеянных) волн.

Установленный факт существенного усиления интенсивности вертикального обмена в зоне сопряжения шельфа и континентального склона по сравнению с районами открытого моря повлечет за собой изменение и уточнение представлений о путях распространения и скоростях трансформации океанологических неоднородностей в исследованных физико-географических условиях.

1. Wunsch C., Ferrari R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the ocean // *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 2004. – **36**. – P. 281–314.
2. Самодуров А. С., Любичкий А. А., Пантелеев Н. А. Вклад опрокидывающихся внутренних волн в структурообразование, диссипацию энергии и вертикальную диффузию в океане // *Мор. гидрофиз. журн.* – 1994. – № 3. – С. 14–27.
3. Дыкман В. З., Багимов И. С., Барабаш В. А., Ефремов О. И., Зубов А. Г., Мязин В. В., Павленко О. И., Самодуров А. С., Чуларев А. М. Измерительный комплекс “Сигма-1” для исследования процессов перемешивания и диссипации энергии в верхнем слое моря // *Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря.* – Т. 10. – Севастополь: Экопси-Гидрофизика. – 2004. – С. 395–409.
4. Samodurov A. S., Ivanov L. I. Mixing and energy dissipation rate in Mediterranean seas: an intercomparison of existing models // *Oceanography of the eastern Mediterranean and Black Sea, Similarities and differences in two interconnected basins.* – Ankara: Tübitak publ., 2003. – P. 369–375.
5. Gregg M. C. Variations in the intensity of small-scale mixing in the main thermocline // *J. Phys. Oceanogr.* – 1977. – **7**, No 3. – P. 436–454.
6. Ivanov L. I., Samodurov A. S. The role of lateral fluxes in ventilation of the Black Sea // *J. Mar. Syst.* – 2001. – 31/1. /3. – P. 159–174.
7. Самодуров А. С. Интрузионное расслоение и вертикальная диффузия в океане за счет приливного перемешивания у наклонного дна // *Мор. гидрофиз. журн.* – 1992. – № 3. – С. 39–46.