

Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.465.15

А.С. Самодуров, А.М. Чухарев

Экспериментальная оценка коэффициента вертикального турбулентного обмена в стратифицированном слое Черного моря в окрестности свала глубин

На основе данных натуральных измерений приводятся расчеты зависимости интенсивности вертикального турбулентного обмена в стратифицированных слоях Черного моря в районе границы шельф – континентальный склон от локальной стратификации. Эксперименты проводились в рамках международных проектов *GEF/BSERP* и «Черное море-2004». Данные получены с использованием зондирующего варианта измерительного комплекса «Сигма-1». При обработке данных измерений применялась основанная на анализе спектров градиента пульсаций температуры методика оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в зависимости от внешних условий. Величины коэффициентов турбулентного обмена для двух исследованных районов на шельфе оказались существенно выше (приблизительно на порядок величины), чем для открытого моря при аналогичных условиях, что можно связать с особенностями рельефа дна, влияющими на динамику квазиинерционных волн, которые служат здесь основным источником мелкомасштабного перемешивания и вертикальной диффузии.

Процессы вертикального турбулентного обмена в верхних слоях Черного моря играют важную роль в перераспределении тепла, соли, различных растворенных химических примесей. Опыт последних десятилетий в создании и верификации моделей, описывающих процессы обмена, показывает, что без детального знания и соответствующего учета основных физических механизмов, участвующих в этих процессах, невозможно получить хорошее качественное и количественное соответствие модельных и натуральных данных. Цель настоящей работы – определение коэффициентов вертикального турбулентного обмена по экспериментальным данным о мелкомасштабной структуре верхнего стратифицированного слоя в районе свала глубин в северо-западной и северо-восточной частях Черного моря. В качестве основного механизма, обеспечивающего вертикальный обмен в исследуемом районе, рассматривается сдвиговая неустойчивость и локальное перемешивание в системе квазиинерционных внутренних волн.

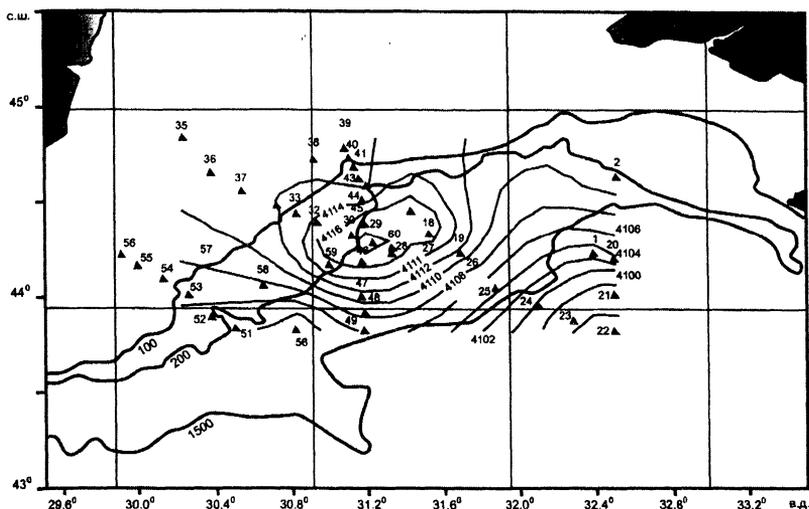
Экспериментальные данные

Один из анализируемых массивов данных получен в мае 2004 г. во время экспедиции на НИС «Академик» Болгарской академии наук в рамках проекта *GEF/BSERP*.

Схема расположения станций представлена на рис. 1. Были собраны экспериментальные данные о тонкой структуре полей скорости течения, темпе-

© А.С. Самодуров, А.М. Чухарев, 2008

ратуры и электропроводности в северо-западной части Черного моря. Сбор данных осуществлялся с помощью зондирующего измерительного комплекса «Сигма-1», конструктивные особенности и технические характеристики которого описаны в [1].

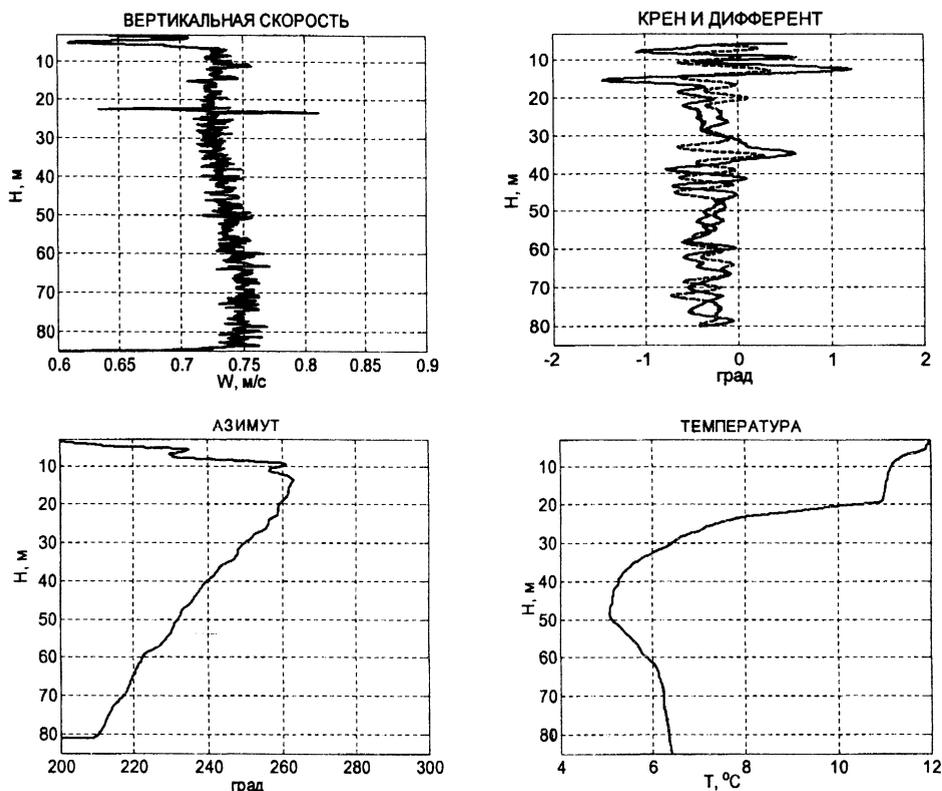


Р и с. 1. Расположение станций в антициклоническом вихре в северо-западной части Черного моря (НИС «Академик», 9 – 18 мая 2004 г.). Толстые линии – изобаты, тонкие – динамическая глубина (см). Рисунок взят из технического отчета по результатам экспедиции

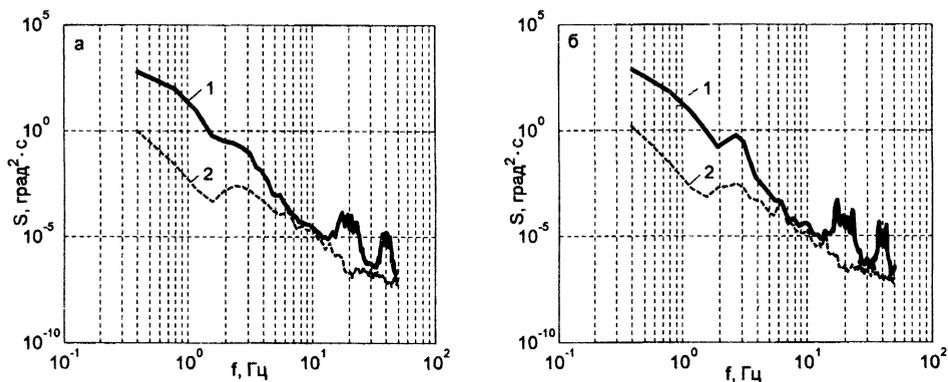
Питание зонда и передача информации на борт судна осуществлялись с помощью специально изготовленного грузонесущего кабеля. Накопление цифровой информации и отображение текущих значений измеряемых параметров производились в реальном времени с помощью персонального компьютера на борту судна.

Зондирования проходили в режиме свободного падения с постоянной скоростью $\sim 0,7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Достаточно большая отрицательная плавучесть зонда и значительное сопротивление гидродинамического тормоза (специального хвостового оперения) способствуют стабилизации скорости погружения. При погружении зонда среднее абсолютное отклонение вертикальной скорости не превышало $0,07 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ при различных метеорологических условиях. Отклонения зонда от вертикальной оси также были незначительными – при установившемся движении среднее абсолютное отклонение крена и дифферента не превышало $0,3^\circ$. На рис. 2 приведены зависимости вертикальной скорости и углов отклонения прибора от вертикали во время зондирования. Скорость устанавливалась с начала падения в течение $\sim 10 \text{ с}$ (6 – 8 м) и в дальнейшем практически не менялась до конца зондирования. Только при прохождении слоя с высокими градиентами плотности отклонения от вертикали и изменения вертикальной скорости были ощутимее, что, видимо, связано со значительными градиентами скорости течения, которые обычно максимальны на нижней границе перемешанного слоя. Вращение вокруг своей оси при погружении было плавным и составляло $\sim 50^\circ$ по азимуту за время зондирования.

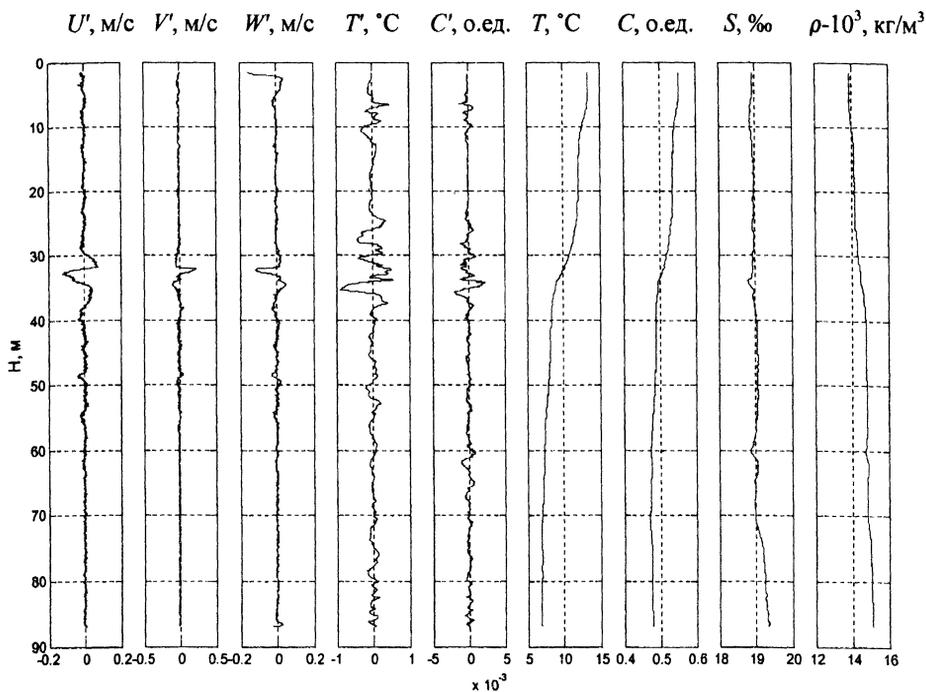
ния (рис. 2). На рис. 3 приведены типичные спектры углов наклона прибора в процессе зондирования. Сопоставление спектров пульсаций скорости и углов отклонения зондирующего комплекса показывает, что в установившемся режиме собственные колебания вносят незначительный вклад в измеренные величины пульсаций скорости.



Р и с. 2. Вертикальная скорость и углы отклонения и поворота прибора в процессе зондирования



Р и с. 3. Спектры углов крена (а) и дифферента (б) на ст. 18 в диапазонах 0 – 90 м (1) и 41 – 83 м (2)



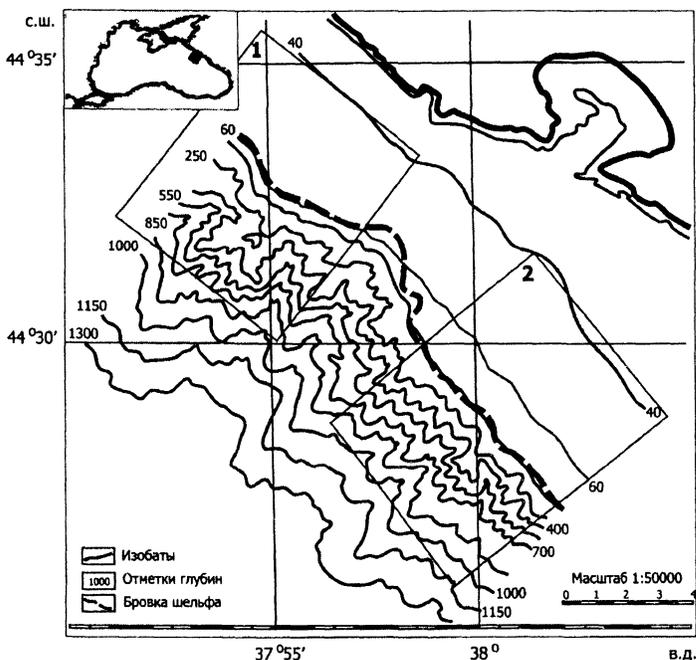
Р и с. 4. Профили измеренных и рассчитанных величин при зондировании измерительным комплексом «Сигма-1» (НИС «Академик», 16.05.2004 г., ст. 41): U' , V' , W' – пульсации горизонтальных и вертикальной компонент скорости; T' – пульсации температуры; C' – пульсации электропроводности; T – средняя температура; C – средняя электропроводность; S – соленость; ρ – плотность

На рис. 4 приведены характерные профили измеренных и рассчитанных величин с повышенными амплитудами пульсаций на определенных горизонтах. Такие достаточно редкие выбросы выявлялись и отбраковывались на стадии предварительной обработки. При анализе рассматривались только участки записей без резких выбросов по пульсационным и средним величинам.

В целом вертикальная структура термохалинных характеристик в исследуемом районе была типичной для данного сезона: однородный слой до глубины 8 – 10 м, затем сезонный термоклин, обусловленный весенним прогревом, ниже (начиная с глубин 25 – 35 м) – основной пикноклин.

В июле 2004 г. аналогичные измерения были выполнены в экспедиции на НИС «Акванавт» (Южное отделение ИО РАН) в северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджик. Исследования проводились в рамках российского проекта «Черное море-2004» севернее и южнее Геленджикской бухты (рис. 5) на двух полигонах размером $\sim 6 \times 5$ миль. Полигоны располагались в районе резкого свала глубин, в их крайних точках глубины составляли от 30 – 40 до 1500 м. Фоновая гидрологическая структура в исследуемом районе также была обычной для этого сезона – верхний перемешанный слой до глубины 9 – 22 м, резкий термоклин и сравнительно медленный рост солености с глубиной. Распределение гидрофизических характеристик было

подобно приведенному на рис. 4 с учетом их сезонного хода: более высокие температуры в приповерхностном слое и более выраженные градиенты в термоклине.



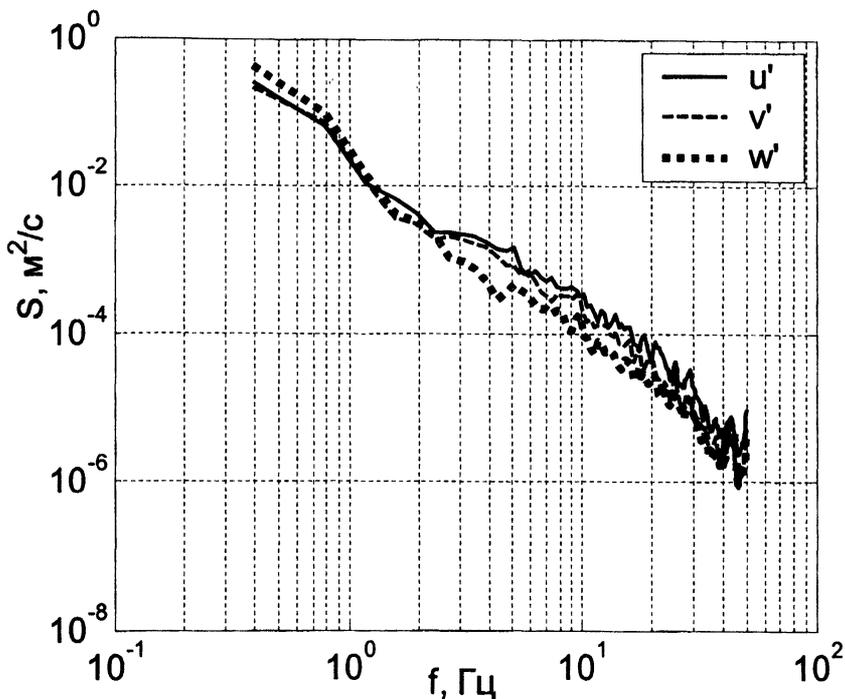
Р и с. 5. Расположение полигонов в районе Геленджикской бухты (проект «Черное море-2004»)

Обработка данных

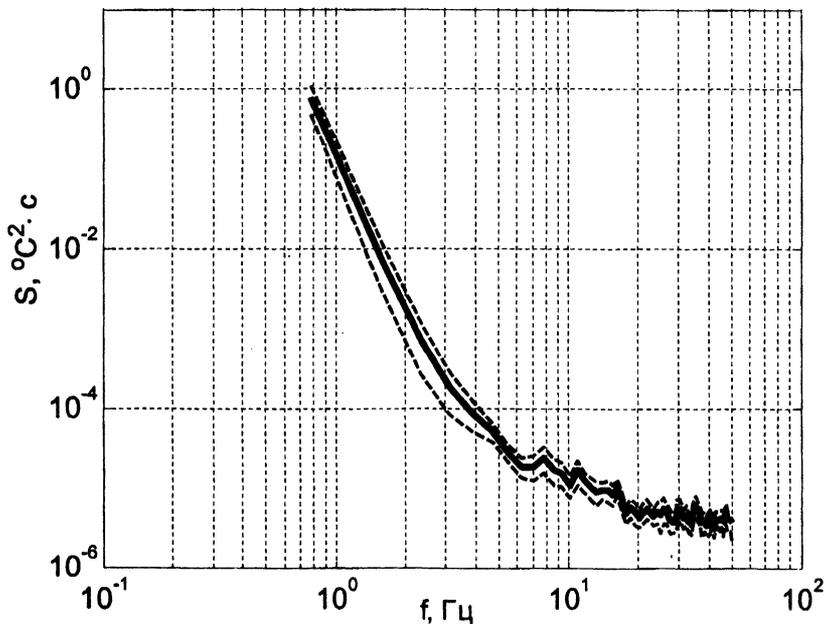
Предварительная обработка собранных данных заключалась, во-первых, в оценке поведения прибора при погружении на основе регистрируемых углов азимута, крена и дифферента носителя (рис. 2, 3). Затем строились графики распределения температуры, электропроводности, солености и плотности по глубине и проводился статистический анализ данных пульсаций компонентов скорости, температуры и электропроводности. По причине ограниченной длины обрабатываемых рядов с целью лучшей статистической обеспеченности расчет спектров для некоторых реализаций проводился по перекрывающимся отрезкам. В тех случаях, когда осуществлялась серия зондирований на одной станции, оценки спектров осреднялись по всем реализациям.

На рис.6 и 7 приведены характерные спектры пульсаций для трех компонентов вектора скорости течения и спектр пульсаций температуры, на котором также нанесены 95%-ные доверительные интервалы. Как видно, достоверность оценок спектров достаточно высока. С учетом того, что прибор во время зондирования все же испытывал колебания, при спектральном анализе предпочтение отдавалось скалярной величине (пульсации температуры) по сравнению с векторной (пульсации скорости). Результаты обработки позволяют судить о характере пульсационного движения (волновой или турбу-

лентной природы), о степени энергоснабжения мелкомасштабной турбулентности и, наконец, в совокупности с другими параметрами исследуемого слоя – о коэффициентах турбулентного обмена.



Р и с. 6. Спектры трех компонент пульсаций скорости



Р и с. 7. Спектр пульсаций температуры и 95%-ные доверительные интервалы (штриховая)

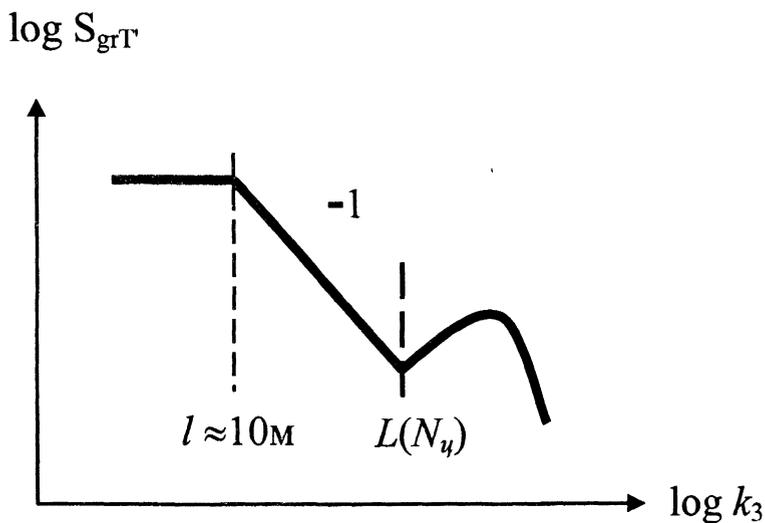
Расчет характеристик турбулентного обмена

То обстоятельство, что оба массива данных измерений собраны в близких физико-географических условиях, позволяет анализировать их совместно. Основная цель анализа полученных данных – определение интегрального вклада процессов, осуществляющих перемешивание и вертикальный обмен в верхнем стратифицированном слое океана, оценка скорости диссипации турбулентной кинетической энергии и коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии. Эти величины существенным образом зависят от внешних условий – плотностной стратификации, сдвиговых потоков и т.д.

В работах [2,3] получена зависимость эффективного масштаба L турбулентных пятен, возникающих за счет сдвиговой неустойчивости и обрушения

внутренних волн, от локальной частоты Брента – Вайсяля $N = \left(\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^{1/2}$ (ρ –

плотность жидкости, g – ускорение свободного падения). Подход основан на анализе структуры спектров первых разностей флуктуаций температуры, измеренных в океане. Ранее было показано, что эффективный вертикальный масштаб природных турбулентных пятен соответствует вертикальному масштабу устойчивого минимума в мелкомасштабной области спектра [4] (см. масштаб L на рис. 8).



Р и с. 8. Схематичная форма спектра флуктуаций градиента температуры для вертикального волнового числа

В районах открытого океана схематичная форма спектров будет такой же и для соответствующих флуктуаций горизонтальной скорости [4]. В [2, 3] приводится зависимость масштаба L от частоты плавучести по измерениям в различных условиях локальной стратификации для открытого океана, Черно го и Средиземного морей.

Метод наименьших квадратов, примененный к части данных (~ 400 спектров), собранных в верхнем термоклине, или «волноводе», показал, что наилучшая аппроксимация осуществляется степенной функцией

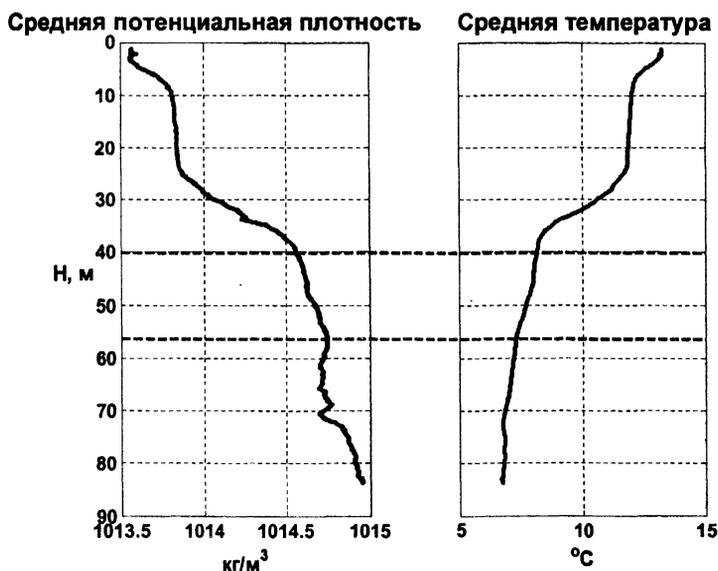
$$L = 1,4N_y^{-1} \text{ м}, [N_y] = \text{цикл} \cdot \text{ч}^{-1}. \quad (1)$$

Этот подход позволяет получить выражение для диссипации турбулентной энергии и коэффициента турбулентной диффузии в широком интервале изменчивости N с привлечением полуэмпирической модели, основанной на энергетическом балансе в системе [2, 3]. Анализ данных дает следующее выражение для коэффициента диффузии $K(N_y)$:

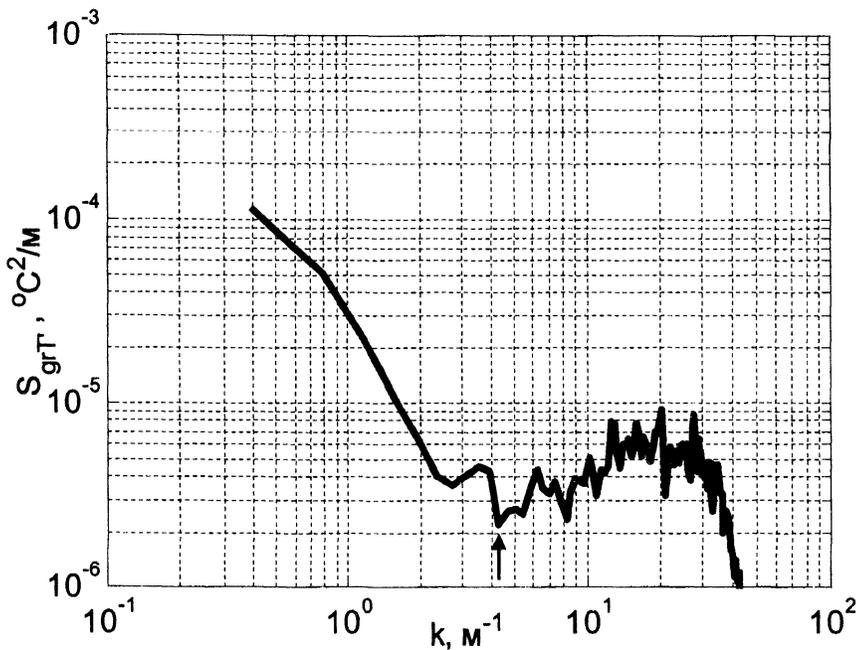
$$K \cong 0,93N_y^{-1} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}. \quad (2)$$

Подход, предложенный в [2, 3], был использован для анализа данных, полученных в верхнем стратифицированном слое Черного моря во время экспедиций на НИС «Академик» и «Акванавт».

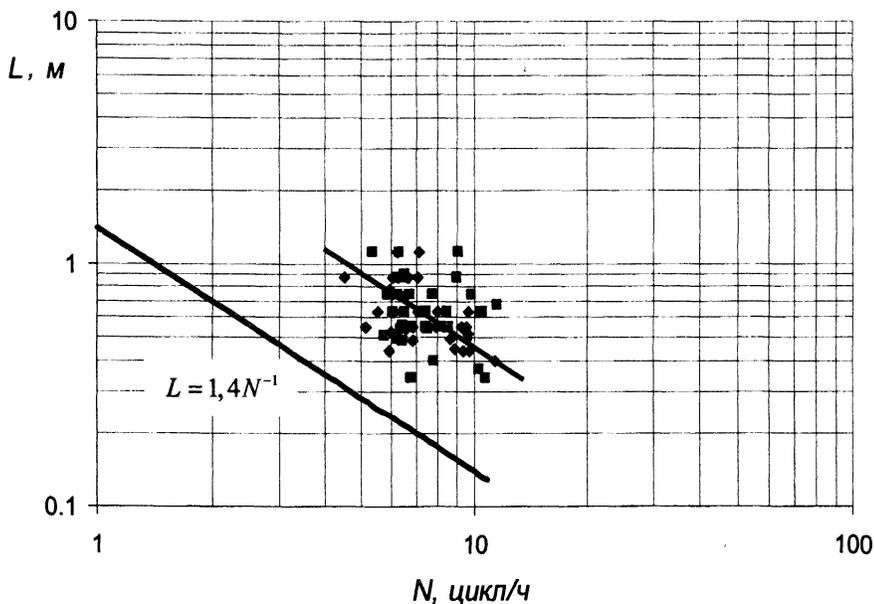
Для оценок характеристик вертикального турбулентного обмена в стратифицированном слое выбирались участки записей с приблизительно постоянным значением величины N , как показано на рис. 9, и рассчитывались вертикальные спектры первых разностей флуктуаций температуры (рис. 10). Для повышения статистической обеспеченности результатов анализа использовались только сравнительно длинные участки записей с диапазоном глубин не менее 15 м, удовлетворяющие требованию постоянства частоты плавучести. Затем строилась зависимость $L(N)$ с использованием упомянутого подхода.



Р и с. 9. Осредненные профили по трем зондированиям (НИС «Академик», ст. 44). Горизонтальными штриховыми линиями отмечен слой, для которого рассчитывался коэффициент турбулентного обмена



Р и с. 10. Спектр градиента температуры в диапазоне глубин 41 – 83 м на ст. 18 в северо-западной части Черного моря



Р и с. 11. Зависимость вертикального масштаба турбулентных пятен L от локальной стратификации N по измерениям в Черном море в 2004 г. (ромбы – данные, полученные на НИС «Академик», квадраты – на НИС «Акванавт»). Нижняя прямая – по данным [2, 3]

Соответствующая зависимость $L(N_y)$ (значки) вместе с аналогичной «средней» зависимостью (прямая линия) представлена на рис. 11. Поскольку данные измерений собраны в сравнительно узком диапазоне масштабов частоты плавучести (менее одной декады), представляется нецелесообразным аппроксимировать их отдельной степенной зависимостью. В предположении, что для обсуждаемых данных степень при N в зависимости масштаба пятен от частоты плавучести соответствует «средней» (2), выражение для коэффициента вертикальной турбулентной диффузии приобретает вид

$$K \cong 8,4N_y^{-1} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}. \quad (3)$$

Сравнение выражений (2) и (3) показывает, что в исследуемых районах коэффициент турбулентной диффузии почти на порядок величины превышает «среднее» значение для открытого моря при одинаковых N . Приведем численные оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии для двух рассмотренных ситуаций. Полагая значение частоты плавучести $5 - 10$ цикл·ч⁻¹ для данного диапазона глубин, получим по порядку величины для коэффициента диффузии K соответственно 10^{-1} и $1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Отметим, что оценка $K \cong 2 \cdot 10^{-1} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ для подобных условий в среднем по Черному морю была независимо получена в работе [5]. Соответствующие оценки для скорости диссипации кинетической энергии составляют 10^{-4} и $10^{-3} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-3}$.

Чтобы понять причины обнаруженного различия, следует прежде всего иметь в виду, что обсуждаемые измерения проводились вблизи свала глубин Черного моря, где существенный вклад в динамику вносит Основное Черноморское течение. К тому же 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 этого фактора 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 $Ri = N^2 / (\partial U / \partial z)^2$, которое характеризует устойчивость стратифицированного потока, весьма далеки здесь от своего «критического» значения, равного 0,25.

Вероятнее всего, основной вклад в обмен в области измерений вносят процессы неустойчивости и перемешивания в системе квазиинерционных внутренних волн. Отличительная особенность исследованных районов – наличие боковой границы – может локально повышать среднюю интенсивность квазиинерционных движений вблизи наклонного дна за счет суперпозиции падающих и отраженных волн. Кроме того, нельзя исключать локального влияния механизма придонного трения на наклонном дне в системе Основного Черноморского течения и синоптических вихрей. О среднем вкладе подобного механизма в вертикальный обмен для масштаба всего бассейна говорится в работе [6]. Надлежащая оценка вклада упомянутых выше факторов в усиление вертикальной диффузии требует дополнительного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дыкман В.З., Багимов И.С., Барабаш В.А. и др. 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. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – Вып. 10. – С. 395 – 409.
2. 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.
3. Samodurov A.S., Ivanov L.I. Mixing and energy dissipation rate in Mediterranean seas: an inter-comparison of existing models // Oceanography of the eastern Mediterranean and Black Sea. Similarities and differences in two interconnected basins. – Ankara: Tübitak Publishers, 2003. – P. 369 – 375.
4. Gregg M.C. Scaling turbulent dissipation in the thermocline // J. Geophys. Res. – 1989. – 94, № С7. – P. 9686 – 9698.
5. 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.
6. Самодуров А.С. Интрузионное расслоение и вертикальная диффузия в океане за счет приливного перемешивания у наклонного дна // Морской гидрофизический журнал. – 1992. – №3. – С. 39 – 46.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 29.05.07

ABSTRACT Based on the data of field measurements presented are the calculations of dependence of intensity of the vertical turbulent exchange in the Black Sea stratified layers in the region of the shelf – continental slope boundary upon the local stratification. The experiments were carried out within the framework of the international projects GEF/BSERP and «Black Sea-2004». The data were obtained by a probe version of the measuring complex «Sigma-1». A method of estimating the coefficients of vertical turbulent diffusion depending on external conditions was applied for data processing. The values of the turbulent exchange coefficients for two shelf regions under study turn out to be much larger (approximately by an order) than those obtained for the open sea regions under analogous conditions. It can be related to the bottom relief features influencing the dynamics of quasi-inertial waves which, in their turn, are the main source of small-scale mixing and vertical diffusion.