

## Моделирование статистического распределения турбулентных пятен в стратифицированных слоях океана

© 2016 А. М. Чухарев<sup>1,\*</sup>, К. В. Руновский<sup>2</sup>, О. Е. Кульша<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

<sup>2</sup>*Севастопольский филиал МГУ им. М. В. Ломоносова, Севастополь, Россия*

*\*E-mail: alexchukh@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.02.2017 г.

Предложена модель для спектра пульсаций плотности в стратифицированном слое жидкости, предполагающая наличие механизма вертикального турбулентного обмена вследствие обрушения внутренних волн и образования турбулентных пятен. Этот механизм достаточно широко распространен во многих районах Мирового океана. При моделировании учитываются два источника колебаний: внутренние волны, существующие во всем слое, и турбулентность, сосредоточенная в пределах некоторого количества пятен, распределенных внутри рассматриваемого слоя. Диапазоны масштабов внутренних волн и турбулентности частично перекрываются, причем максимальный масштаб турбулентных пульсаций ограничен размерами пятна. На основе теории спектра локально-изотропной турбулентности и предположения, что внутри пятна осцилляции описываются гармоническими функциями, показано, что их локальная частота и локальная амплитуда связаны аналитическим соотношением. В модельных функциях амплитуды и фазы колебаний рандомизируются, к ним добавляется белый шум. Определены основные особенности влияния различных задаваемых характеристик пятен и внутренних волн на форму спектра. Анализ экспериментальных данных с помощью предложенной модели позволяет оценить масштаб пятен, их количество и уровень турбулентной энергии в пятнах. Модель также демонстрирует справедливость разработанного ранее энергетического подхода к определению масштаба турбулентных пятен.

**Ключевые слова:** стратифицированный слой, вертикальный обмен, внутренние волны, микроструктура, спектральная модель, турбулентное пятно.

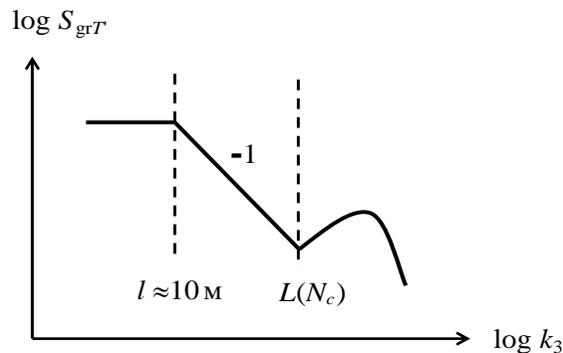
DOI: 10.22449/0233-7584-2017-5-35-46

### Введение

Перемешивание в стратифицированных слоях океана имеет явно выраженную особенность – увеличение плотности с глубиной приводит к ограничению интенсивности вертикальных движений. Поэтому до середины XX в. считалось, что в толще океана при устойчивой стратификации вертикальный обмен практически отсутствует, что отразилось в предложениях устраивать на дне морей, в частности Черного моря, захоронения радиоактивных отходов. Но измерения с помощью высокоразрешающих *CTD*-зондов показали: изменения гидрологических характеристик с глубиной носят сложный перемежающийся характер – слои с определенным градиентом плотности чередуются с полностью перемешанными слоями жидкости, что обусловлено действием различных физических механизмов, важнейшим из которых является турбулентность.

По современным представлениям, особая роль в вертикальном перемешивании в стратифицированных слоях принадлежит внутренним волнам. Устойчивая стратификация, затрудняя турбулентный обмен, способствует

развитию интенсивных внутренних волн, поэтому наиболее вероятным источником турбулентности и формирования микроструктуры гидрофизических полей в океане являются внутренние волны [1]. Считается, что механизм локальной неустойчивости и обрушения квазигоризонтальных сдвиговых течений, создаваемых инерционно-гравитационными внутренними волнами, вносит основной вклад в вертикальный турбулентный обмен во многих районах Мирового океана [2]. Многочисленные наблюдения в океане подтверждают тот факт, что турбулентность в стратифицированных течениях генерируется нерегулярными событиями нарушения устойчивости, приводящими к появлению отдельных турбулентных пятен [3]. Турбулентное перемешивание внутри таких пятен в результате формирует вертикальные потоки тепла и массы в природных течениях. Спектры, построенные на основе измерений пульсационных величин при зондировании в таких слоях, обладают при этом некоторыми общими чертами, которые были описаны в работе [4]. На рис. 1 представлен схематично спектр градиента пульсаций температуры, на котором можно выделить участки, соответствующие внутренним волнам и турбулентности [4].



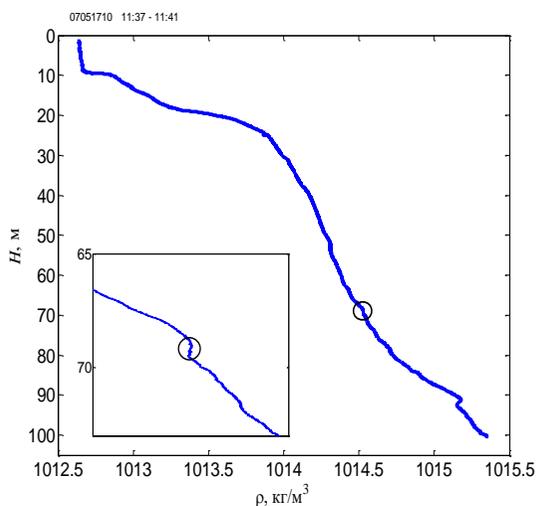
**Рис. 1.** Схематичная форма спектра флуктуаций градиента температуры для вертикального волнового числа по Греггу [4]. Масштаб  $L$ , зависящий от циклической частоты Брента-Вейс-ля  $N_c$ , соответствует эффективному масштабу турбулентных пятен

Исследованию влияния внутренних волн на турбулентный обмен посвящено достаточно много работ. Фундаментальные работы С. Торпа [5, 6], Т. Осборна [7] и других авторов внесли существенный вклад в развитие представлений о динамических процессах в стратифицированных слоях. Из недавних работ можно выделить среди многих других экспериментальное исследование внутренних волн в термоклине [8], при этом авторами обнаружено влияние волн Кельвина на интенсивность турбулентности. В статье [9] выполнено прямое численное моделирование поведения устойчиво-стратифицированного течения с учетом зависимости вязкости жидкости от температуры при различных числах Рейнольдса. В работе [10] на основе наблюдений в Антарктическом циркумполярном течении изучались пространственное распределение скорости диссипации турбулентной энергии и диапикническое перемешивание, причем было показано, что скорость диссипации выше в областях с более высокой интенсивностью внутренних волн, а также вблизи неровностей дна.

В настоящей работе проведено математическое моделирование влияния турбулентных пятен на форму спектра пульсационных величин в устойчиво стратифицированном слое жидкости, в котором существует также некий набор внутренних волн с различной амплитудой и случайной фазой. Целью данного моделирования была разработка метода анализа экспериментальных данных, включая оценку влияния количества и размера пятен, образующихся внутри слоя, на форму спектра, а также проверка достоверности описанного в работе [11] метода определения размеров пятен по локальному минимуму вертикального спектра градиентов пульсаций. Важным вопросом при интерпретации экспериментальных спектров, в решении которого также может помочь модельное исследование, является оценка количественного соотношения интенсивности турбулентных пульсаций и внутренних волн. Отдельные элементы представленных здесь результатов обсуждались в диссертационной работе одного из авторов [12].

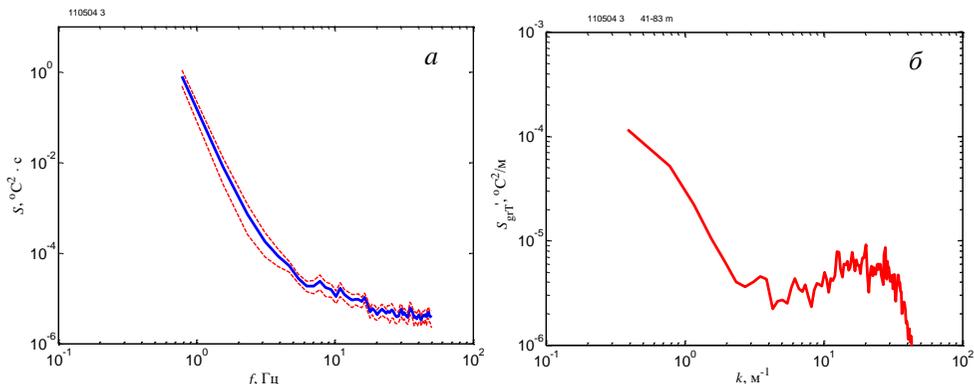
### Моделирование турбулентных пятен

Как уже отмечалось, опрокидывание внутренних волн и формирование прослоек с повышенной интенсивностью турбулентности – один из важнейших механизмов вертикального обмена в стратифицированных слоях. Поскольку в таких слоях, как правило, существует одновременно множество систем внутренних волн, локализация образования турбулентных пятен является случайным процессом. Основным фактором, повышающим вероятность обрушений, является увеличение плотности энергии волн на единицу объема. Число и размеры турбулентных пятен, следовательно, определяются интенсивностью внутренних волн и в конечном счете характеризуют эффективность вертикального перемешивания. Реальные профили гидрофизических характеристик отражают наличие таких перемешанных областей, образовавшихся в результате обрушений, что хорошо видно на рис. 2.



**Рис. 2.** Проявления турбулентных пятен на профилях плотности (по данным зондирования комплексом «Сигма-1» в экспедиции на НИС «Эксперимент» в северо-западной части Черного моря, 2007 г.) [13, 14]. Кружком показано местоположение одного пятна, на врезке – в увеличенном виде

На рис. 3 представлены экспериментальные энергетические спектры пульсаций температуры и пульсаций градиента температуры. В данном случае температура вносит определяющий вклад в изменение плотности. Как было показано в работе [4], локальный минимум на спектре градиентов соответствует эффективному масштабу турбулентных пятен.



**Рис. 3.** Экспериментальные спектры по измерениям комплексом «Сигма-1» в Черном море, НИС Akademik, 2004 г., ст. 18 [14]: *a* – спектр пульсаций температуры в диапазоне глубин 41 – 83 м, тонкие линии – 95%-ный доверительный интервал, *б* – спектр пульсаций градиента температуры в зависимости от вертикального волнового числа

Для построения математической модели отметим, что в турбулентном пятне  $\Delta = [\tau - L/2, \tau + L/2]$  масштаба  $L$  с центром в точке  $z = \tau$  плотность можно выразить как

$$\rho(z) = L \psi\left(\frac{z - \tau + L/2}{L}\right) + c, \quad z \in \Delta, \quad (1)$$

где  $c$  – константа, определяемая значениями  $\rho(z)$  на его границах;  $\psi$  – некоторая универсальная функция с компактным носителем, сконцентрированным в интервале  $[0, 1]$ .

Напомним, что для обоснования формулы (1), помимо гипотез А. Н. Колмогорова о свойствах локально-изотропной турбулентности [15], была использована следующая аргументация. Пусть  $g(x)$  – некоторая функция, а  $G(x) = g(L^{-1}x)$ . Значком сверху будем обозначать преобразование Фурье:

$$\hat{g}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp(-ikx) dx,$$

где  $k$  – волновое число. Известно следующее свойство этого преобразования:

$$\hat{G}(k) = L \hat{g}(Lk).$$

Отсюда следует, что формула (1) находится в полном соответствии с полученной на основе экспериментальных данных аппроксимацией спектра пульсаций градиента температуры в пятне, которая имеет следующий вид [14]:

$$F(k) = \left| \frac{\partial \hat{T}'}{\partial z}(k) \right|^2 = \begin{cases} 0, & 0 < k \leq (2\pi)/L \\ \gamma(L)k^{1/3}, & k > (2\pi)/L \end{cases} \quad (2)$$

Множитель  $\gamma(L) = L$  перед  $\psi$  в формуле (1) находится из уравнения для точки локального минимума  $k_{\min}$  спектра градиента в слое с одним турбулентным пятном масштаба  $L$

$$k^2 \gamma(L) L \Phi(Lk) = 1,$$

где функция  $\Phi(x) = c_w^{-1} (\hat{\psi}(x) + x \hat{\psi}'(x))$ ;  $c_w$  – некоторая положительная константа, характеризующая волновые процессы, происходящие в исследуемом слое, при этом учитывается тот экспериментальный факт, что  $k_{\min}$  в случае одного пятна имеет порядок  $L^{-1}$  по отношению к его масштабу, т. е.  $k_{\min} \sim L^{-1}$  [14].

Согласно концепции, приведенной в работе [16, с. 141 – 144], функция  $\psi(z)$ , описывающая процесс в «единичном» турбулентном пятне  $[0,1]$ , представляет собой некоторую сумму так называемых чирпов (от англ.: *chirp* – «импульс с частотной модуляцией»), т. е. функций вида

$$f_{\alpha, \beta, \zeta}(z) = A |z - \zeta|^\alpha \cos(B |z - \zeta|^{-\beta}), \quad \alpha, \beta > 0, \quad \zeta \in (0, 1), \quad (3)$$

локализованных на окрестности их центров  $\zeta$  путем умножения на некоторую финитную неотрицательную четную функцию  $\varphi(z - \zeta)$ , удовлетворяющую условию  $\varphi(0) = 1$ . В существующей терминологии  $\alpha$  называют показателем Гёльдера, а  $\beta$  – показателем осцилляций [16].

В работе [17] получена следующая приближенная формула:

$$\hat{f}_{\alpha, \beta, \zeta}(v) \approx C(\alpha, \beta, A, B) v^{-\frac{2\alpha+\beta+2}{2(\beta+1)}} e^{i\eta(v; \alpha, \beta, A, B)}, \quad (4)$$

которая описывает поведение преобразования Фурье чирпа с параметрами  $\alpha$ ,  $\beta$  в области средних частот, где  $C(\alpha, \beta, A, B)$  и  $\eta(v, \alpha, \beta, A, B)$  – некоторые известные константа и функция переменной  $v$  соответственно. Из формулы (2) вытекает оценка скорости убывания его спектра:

$$|\hat{f}_{\alpha, \beta, z_0}(v)|^2 \sim v^{-\frac{2\alpha+\beta+2}{\beta+1}}. \quad (5)$$

На основании методики оценивания порядков преобразования Фурье, разработанной в работе [18], можно сделать вывод о том, что локализация чирпа путем его умножения на некоторую бесконечно дифференцируемую функцию  $\varphi(z - \zeta)$  с носителем, сконцентрированным в некоторой окрестности центра, не оказывает влияния на выполнимость соотношений (4) и (5).

Комбинируя выражение (5) с вытекающим из гипотез Колмогорова порядком убывания спектра –  $5/3$  [15], можно сделать вывод о том, что в турбулентной зоне локальная амплитуда  $|z - \zeta|^\alpha$  и локальная частота  $|z - \zeta|^{-\beta-1}$  не являются произвольными, а связаны между собой жестким аналитическим соотношением:

$$\frac{2\alpha + \beta + 2}{\beta + 1} = \frac{5}{3},$$

откуда следует

$$\beta = 3\alpha + \frac{1}{2}. \quad (6)$$

Таким образом, это наблюдение означает, что в сумме, выражающей функцию  $\psi(z)$ , присутствуют лишь чирпы, у которых показатель Гёльдера и показатель осцилляций связаны соотношением (6), а сама схема является одномерной, а не двумерной, как это изначально предполагалось в работе [16].

В дискретной модели ось  $\alpha$  разбивается точками  $\alpha_j = \delta_j, j = 1, 2, \dots, N$ . Соответствующие множества  $\Omega_j$  точек  $\zeta$ , в которых присутствует чирп с параметрами  $\alpha_j$  и  $\beta_j = 3\alpha_j + 1/2$ , могут быть определены на основании тех или иных экспериментальных данных. При этом пересчеты данных с пятна некоторого масштаба  $L$  на 1 осуществляются согласно формуле (1).

Дополняя гипотезы о локально-изотропной турбулентности предположением об определенной равномерности распределения турбулентных характеристик в пятне, получаем, что в дискретном варианте каждое множество  $\Omega_j$  изображается некоторым конечным набором  $\{\zeta_j^{k_j}\}_{k_j=1}^{P_j}$  равномерно распределенных на отрезке  $[0, 1]$  точек. Число таких точек  $P_j$  для  $j$ -го пятна находится из условия соответствия модели экспериментальным данным.

Учитывая, что на основании высказанного предположения параметры  $A$  и  $B$  в формуле (3) должны быть статистически одинаковыми для всех чирпов с центрами в точках одного блока  $\Omega_j$ , получаем следующую формулу для модельного описания функции  $\psi(z)$ :

$$\psi(z) = \sum_{j=1}^N \sum_{k_j=1}^{P_j} A_j |z - \zeta_j^{k_j}|^{\alpha_j} \cos(B_j |z - \zeta_j^{k_j}|^{-(3\alpha_j + 1/2)}) \varphi(z - \zeta_j^{k_j}).$$

В начальной модели предполагается, что параметры  $A_j$  и  $B_j$  выбираются практически произвольным образом, но так, чтобы удовлетворялось естественное с физической точки зрения условие: непрерывная норма первого слагаемого в формуле (1) должна быть несоизмеримо меньше второго члена, т. е. флуктуации плотности должны быть значительно меньше средней величины. На самом же деле, с учетом информации о  $C$  и  $\eta$  из формулы (4), эти параметры допускают описание при помощи некоторой единой универсальной константы  $c_{\text{turb}}$ , отвечающей за уровень турбулентности в рассматриваемом пятне или слое.

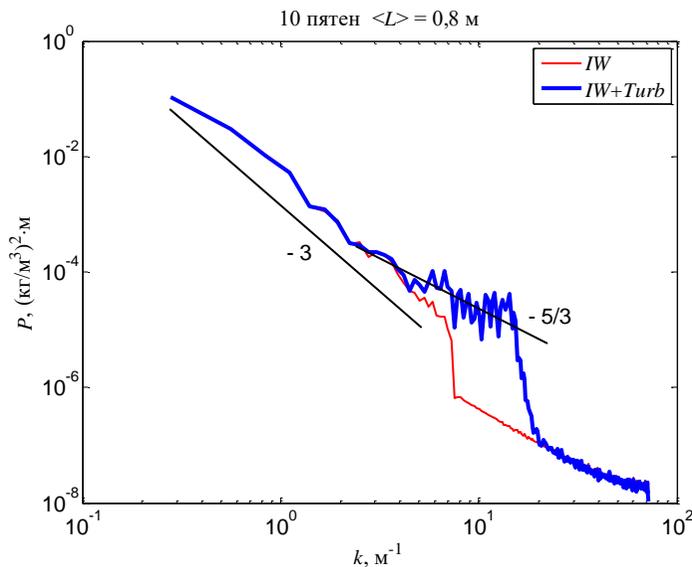
Другое возможное уточнение модели связано с заменой функции  $\cos$  в формуле (1) на некоторую линейную комбинацию косинусов и синусов, т. е. с введением фазы, что приводит к следующей формуле, учитывающей наличие внутренних волн и турбулентных пятен в стратифицированном слое:

$$\Psi_{\alpha,\beta}(z) = az + \sum_{i=1}^M b_i^\alpha \sin(l_i z) + \theta(z) + \left[ \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^P c_{j,k}^\beta \cos(\lambda_{j,k} z_{1k}) + \xi_k(z_{1k}) \right], \quad (7)$$

где  $a, b, c$  – некоторые размерные коэффициенты;  $\alpha$  и  $\beta$  – показатели степени, определяющие закон изменения спектра соответствующего процесса;  $l$  и  $\lambda$  – волновые числа внутренних волн и турбулентных пульсаций соответственно;  $M$  и  $P$  – число их гармоник;  $N$  – количество турбулентных пятен;  $\theta$  и  $\xi_k$  – белый шум разной интенсивности;  $z$  – вертикальная координата;  $z_1$  – координата в пятне. Первый член в правой части модельного ряда добавлен для общего соответствия искомой функции реальной величине (наличие стратификации) и при расчете спектра не учитывался. Вторым и третьим членами соответствуют волновому участку спектра, четвертым и пятым (в квадратных скобках) – турбулентному.

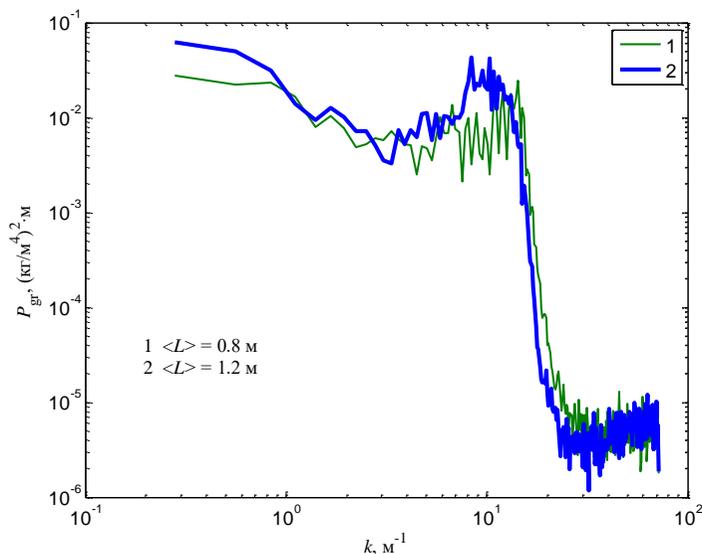
### Результаты расчетов

Для получения удовлетворительного согласия с экспериментальными спектрами на приведенных примерах (рис. 3) в расчетах по формуле (7) использовалось до 80 гармоник для внутренних волн и до 50 для турбулентных пульсаций. Модельный спектр внутренних волн с турбулентностью и в ее отсутствие приведен на рис. 4. Размер пятен  $L$  в данном случае задавался в диапазоне от 0,1 до  $L_{\max} = 1,5$  м, местоположение – через равные промежутки во всем слое. При моделировании турбулентных пятен использовалась функция с компактным носителем, ограничивающая размах пульсаций пределами этого пятна.



**Рис. 4.** Модельные энергетические спектры внутренних волн ( $IW$ ) и суммарного сигнала внутренних волн и турбулентности, сосредоточенной в пределах пятен ( $IW + Turb$ ). Количество пятен равнялось 10, они через равные промежутки распределены во всем слое, средний масштаб пятен  $\langle L \rangle \approx 0,8$  м

Одной из задач, решаемых с помощью такого моделирования, была проверка описанного в работе [11] метода, использовавшегося при расчете среднего размера турбулентных пятен  $\langle L \rangle$  по вертикальным спектрам температуры и ее градиента. На рис. 5 приведены примеры спектров градиентов с различными задаваемыми средними размерами модельных пятен. Как видим, имеется хорошее соответствие с масштабами  $L_k$ , определяемыми по локальному минимуму на спектре. Таким образом, правомерность метода, использовавшегося для оценки  $\langle L \rangle$ , подтверждается моделированием.



**Рис. 5.** Модельный спектр градиента пульсаций при различных средних масштабах турбулентных пятен. Количество пятен в обоих случаях равнялось 10.  $\langle L \rangle$  – задаваемый средний масштаб пятен

Полезно также оценить с помощью моделирования изменение формы спектра в зависимости от количества пятен, распределения их по размерам, локализации по глубине и т. д. На рис. 6 представлен ряд модельных спектров, рассчитанных для различных масштабов турбулентных пятен, а также при разной интенсивности как внутренних волн, так и турбулентности в пятнах.

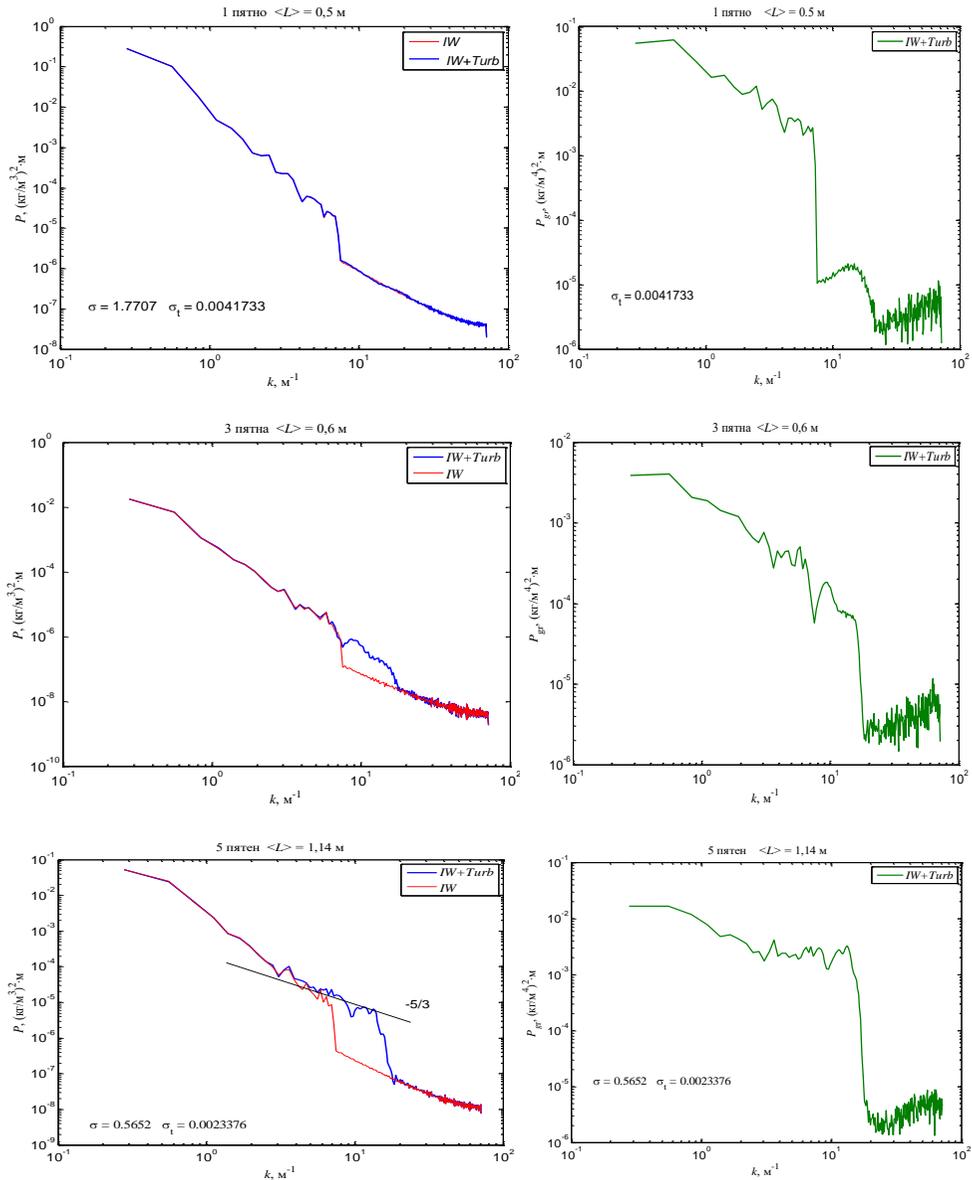
Расчет модельных спектров в разных комбинациях входных параметров позволил определить некоторые особенности влияния задаваемых характеристик пятен и внутренних волн на форму спектров:

- Размер пятен влияет на местоположение локального минимума на спектре: увеличение среднего размера в целом приводит к смещению минимума в длинноволновую часть спектра, однако в отдельных случаях могут быть и отклонения от этого правила, что определяется интенсивностью турбулентности внутри пятен.

- Упорядочивание пятен по размерам (увеличение или уменьшение с глубиной) не влияет на форму спектра.

– Увеличение количества пятен (при сохранении среднего размера) приводит к повышению спектрального уровня в области масштабов турбулентных пятен, что может повлиять и на положение минимума.

– Положение локального минимума зависит от соотношения уровней интенсивности колебаний, обусловленных внутренними волнами и турбулентностью; при этом изменяется и общий уровень спектра.



**Рис. 6.** Модельные спектры пульсаций (слева) и градиента пульсаций (справа) для различного количества турбулентных пятен и разных уровней энергии,  $\sigma$  – дисперсия полного сигнала,  $\sigma_t$  – дисперсия турбулентных пульсаций

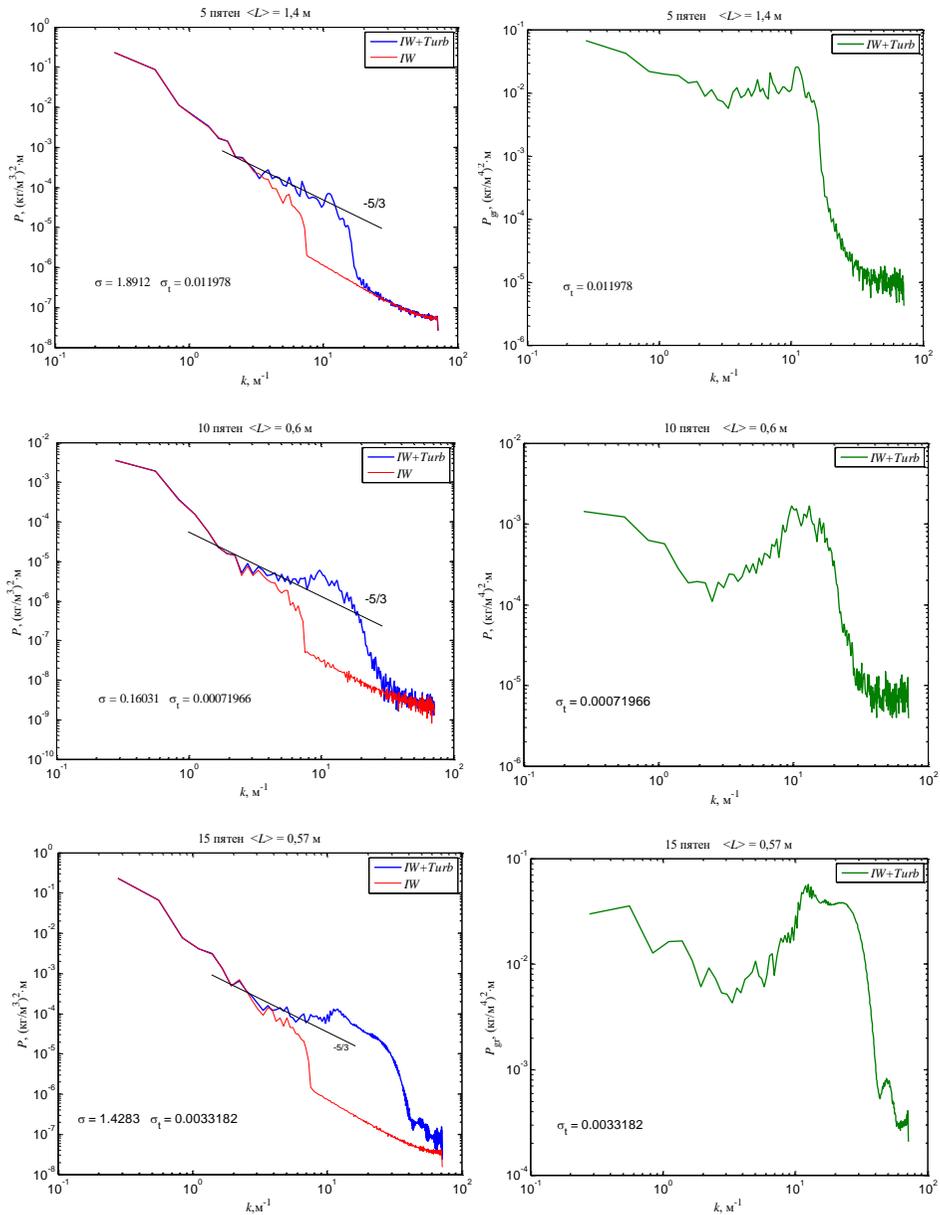


Рис. 6. (продолжение)

Необходимо подчеркнуть, что отмеченные особенности справедливы в среднем, отдельные реализации показывали умеренный разброс как в уровнях энергии внутренних волн, так и в форме и уровне спектра турбулентных пульсаций, поскольку каждый отдельный расчет зависит от случайного набора колебаний.

Таким образом, использованный подход к построению модельных микроструктурных спектров позволяет получать близкие к реальным данным результаты и путем сопоставления производить оценки турбулентных характе-

ристик в натуральных данных. Полезность такой модели заключается как в верификации теоретических выводов, так и в обнаружении новых закономерностей в формировании и динамике турбулентных пятен в стратифицированных слоях. Сравнительный анализ экспериментальных и модельных спектров дает при этом возможность оценить количество турбулентных пятен и среднюю интенсивность турбулентных пульсаций в исследуемом слое.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0827-2014-0010 при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-05-00664.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Физика океана*. Т. 2: Гидродинамика океана / отв. ред. В.М. Каменкович, А.С. Монин. – М.: Наука, 1978. – 456 с.
2. Wunsch C., Ferrari R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans // *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 2004. – 36. – P. 281 – 314. – <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122121>
3. Hebert D., Moum J.N., Paulson C.A. et al. Turbulence and internal waves at the equator. Part II: Details of a single event // *J. Phys. Oceanogr.* – 1992. – 22, No. 11. – P. 1346 – 1356. – [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1992\)022<1346:TAIWAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1992)022<1346:TAIWAT>2.0.CO;2)
4. Gregg M.C. Scaling turbulent dissipation in the thermocline // *J. Geophys. Res.* – 1989. – 94, Iss. C7. – P. 9686 – 9698. – doi:10.1029/JC094iC07p09686
5. Thorpe S.A. Experiments on instability and turbulence in a stratified shear flow // *J. Fluid Mech.* – 1973. – 61, Iss. 4. – P. 731 – 751. – <https://doi.org/10.1017/S0022112073000911>
6. Thorpe S.A. Transitional phenomena and the development of turbulence in stratified fluids: A review // *J. Geophys. Res.* – 1987. – 92, Iss. C5. – P. 5231 – 5248. – doi:10.1029/JC092iC05p05231
7. Osborn T.R. Vertical profiling of velocity microstructure // *J. Phys. Oceanogr.* – 1974. – 4, No. 1. – P. 109 – 115. – [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1974\)004<0109:VPOVM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1974)004<0109:VPOVM>2.0.CO;2)
8. Preusse M., Peeters F., Lorke A. Internal waves and the generation of turbulence in the thermocline of a large lake // *Limnol. Oceanogr.* – 2010. – 55, Iss. 6. – P. 2353 – 2365. – doi:10.4319/lo.2010.55.6.2353
9. Zonta F., Onorato M., Soldati A. Turbulence and internal waves in stably-stratified channel flow with temperature-dependent fluid properties // *J. Fluid Mech.* – 2012. – 697. – P. 175 – 203. – <https://doi.org/10.1017/jfm.2012.51>
10. Waterman S., Naveira-Carabato A.C., Polzin K.L. Internal waves and turbulence in the Antarctic Circumpolar Current // *J. Phys. Oceanogr.* – 2013. – 43, No. 2. – P. 259 – 282. – <https://doi.org/10.1175/JPO-D-11-0194.1>
11. Самодуров А.С., Любичкий 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.
12. Чухарев А.М. Вклад основных механизмов генерации турбулентности в вертикальный обмен в деятельном слое моря: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Севастополь, 2014. – 275 с.
13. Самодуров А.С., Дыкман В.З., Барабаш В.А. и др. Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря // *Морской гидрофизический журнал*. – 2005. – № 5. – С. 60 – 71.
14. Самодуров А.С., Чухарев А.М. Экспериментальная оценка коэффициента вертикального турбулентного обмена в стратифицированном слое Черного моря в окрестности свала глубин // *Морской гидрофизический журнал*. – 2008. – № 6. – С. 14 – 24.
15. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика: Механика турбулентности [в 2 ч.]. Ч. 2. – М.: Наука, 1967. – 720 с.

16. *Jaffard S., Meyer Y., Ryan R.D.* Wavelets: Tools for Science & Technology. – Philadelphia: SIAM, 2001. – 255 p. – URL: <http://bookre.org/reader?file=697422&pg=1> (дата обращения 01.02.2017).
17. *Innocent J.-M., Torrèsani B.* A multiresolution strategy for detecting gravitational waves generated by binary coalescence. Internal Report CPT-96/P.3379, CPT-CNRS. – Marseille, 1996. – 13 p.
18. *Runovski K., Schmeisser H.-J.* Moduli of smoothness related to the Laplace-operator // J. Fourier Analys. Applicat. – 2015. – 21, Iss. 3. – P. 449 – 471. – doi:10.1007/s00041-014-9373-y

## **Modeling of turbulent patches statistical distribution in the stratified ocean layers**

**A. M. Chukharev<sup>1,\*</sup>, K. V. Runovsky<sup>2</sup>, O. E. Kulsha<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Branch of the M.V. Lomonosov Moscow State University in Sevastopol, Russian Federation*

*\*e-mail: alexchukh@mail.ru*

Model for the spectrum of density pulsations in a stratified layer of fluid is proposed. It assumes presence of the mechanism vertical turbulent exchange resulting from breaking of the internal waves and formation of the turbulent patches. The mechanism is considered to be quite widespread in many regions of the World Ocean. Modeling implies consideration of two sources of fluctuations: internal waves existing in the whole layer and turbulence concentrated within a certain number of patches distributed within the layer under consideration. The scale ranges of the internal waves and turbulence are partially overlapped; at that the maximum scale of turbulent pulsations is limited by a patch size. Basing on the theory of locally isotropic turbulence and assuming that the oscillations inside a patch are described by harmonic functions, it is shown that their local frequency and local amplitude are connected by the analytical relationship. In the model functions, both the amplitudes and the phases of oscillations are randomized, white noise is added to them. The major features of influence of various specified characteristics of the patches and internal waves upon the spectrum shape are determined. The experimental data have being analyzed by means of the proposed model permit to assess the scales and amount of the patches, as well as the level of turbulence energy in them. The model also exhibits validity of the earlier developed energy approach for defining the scales of turbulent patches.

**Keywords:** stratified layer, vertical exchange, internal waves, microstructure, spectral model, turbulent patch.