



Связь тонкоструктурного расслоения стратифицированной водной среды с вертикальным турбулентным массообменом¹

Герасимов В.В., Зацепин А.Г.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

В турбулентном течении стратифицированной жидкости со сдвигом скорости вертикальный поток массы Q обычно представляют в виде:

$$Q = K(dp/dz), \quad (1)$$

где K — коэффициент вертикального турбулентного обмена, который не является константой, а зависит от числа Ричардсона. Поскольку стратификация подавляет турбулентность можно допустить, что K есть убывающая степенная функция Ri :

$$K \sim CRi^{-n}, \quad \text{где } n > 0. \quad (2)$$

Если $n > 1$, то из (1)–(2), следует, что поток массы Q является убывающей функцией градиента плотности dp/dz .

Это означает, что если где-то в потоке градиент плотности локально увеличился, то поток массы через эту область — уменьшился, из-за чего градиент вырос еще больше.

Данная ситуация неустойчива: малое отклонение от равновесия приводит к дальнейшему росту

отклонения. Поток стремится разбиться на однородные слои, разделенные ступеньками с большим градиентом плотности, где обмен затруднен [1, 2].

При $n < 1$ неустойчивость отсутствует, локальные неоднородности градиента рассасываются, так как поток массы Q является возрастающей функцией dp/dz .

Для экспериментальной проверки данной модели были проведены опыты с однородным по вертикали перемешиванием колеблющимися вертикальными стержнями изначально линейного вертикального градиента солёности: $(\partial S/\partial z)_0$, который изменялся по величине от опыта к опыту. Микродатчиком электропроводности измерялись профили солёности $S(z)$ и, по изменению солёности в приповерхностном слое со временем, рассчитывался средний по вертикали поток соли Q_s , который рассматривался в зависимости от числа Ричардсона, $Ri = (g/\rho)(\partial\rho/\partial z)d^2/u^2$, где $\partial\rho/\partial z = \beta\partial S/\partial z$ — текущий градиент плотности по вертикали, $(g/\rho)d^2/u^2 = const$, g — ускорение свободного падения, ρ — плотность воды, β — коэффициент солёностного сжатия, d — диаметр стержней, u — их скорость, средняя по периоду колебания (Рис. 1).

В опытах с тонкоструктурным ступенчатым

¹Работа выполнена по теме госзадания FMWE-2021-0002.

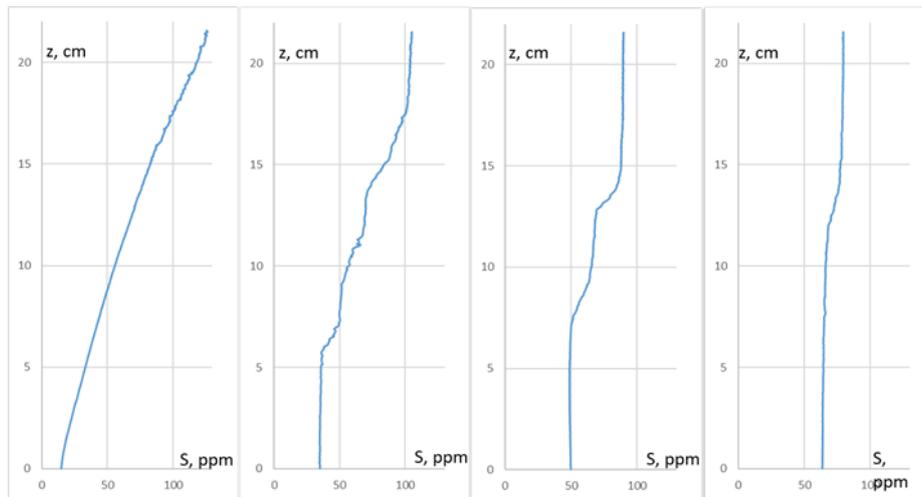


Рис. 1. Профили солености: начальный (квазилинейный), два последующих – ступенчатые и квазилинейный – на завершающей стадии опыта

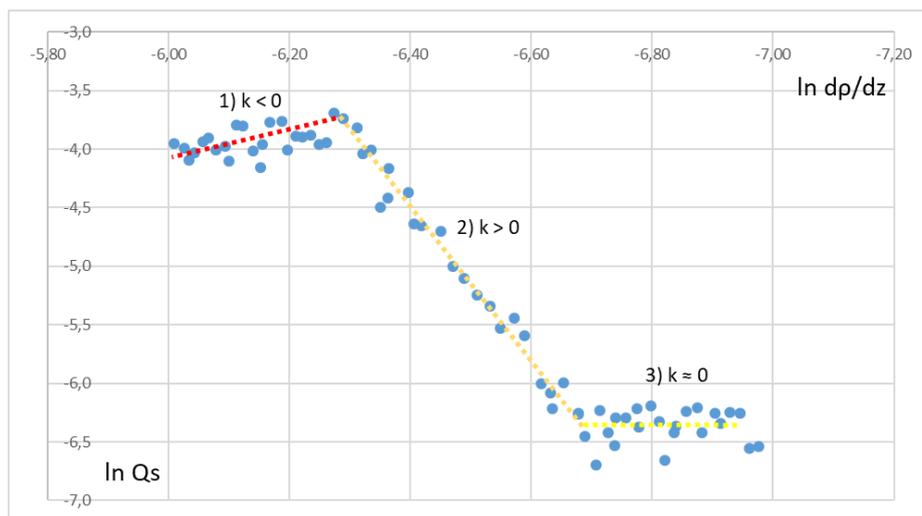


Рис. 2. Зависимость логарифма потока массы от логарифма градиента плотности (переменная составляющая числа Ri) с аппроксимирующими линиями, характеризующими различные этапы эволюции тонкой структуры. $k = n - 1$ – коэффициент аппроксимирующей прямой

расслоением водной среды (наблюдавшемся при большом начальном градиенте солености) обнаружен различный характер поведения вертикального потока солености (массы) в зависимости от текущего значения числа Ричардсона – вертикального градиента плотности (солености).

На Рис. 2 приведены экспериментальные точки и аппроксимирующие линии зависимости логарифма потока солености от логарифма градиента плотности для этапов образования, эволюции и разрушения тонкой структуры: первый этап – образование устойчивых во времени слоев – поток растёт с уменьшением градиента; второй этап – слои разрушаются при убывании потока с умень-

шением градиента; третий этап – слои разрушились (опять квазилинейная стратификация), поток практически не зависит от градиента.

Результаты опытов в целом подтвердили механизм тонкоструктурного расслоения изначально линейно стратифицированной водной среды при однородном по вертикали турбулентном перемешивании, предложенный в [1, 2].

Список литературы

- [1] Phillips O.M. Turbulence in a strongly stratified fluid: Is it unstable? In Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 1972. V. 19. P. 7–81.
- [2] Posmentier E.S. The generation of salinity fine structure by vertical diffusion. J. Phys. Oceanogr. 1977. V. 7. P. 298–300.