

УДК 551.465

О СВЯЗИ ТОНКОСТРУКТУРНОГО РАССЛОЕНИЯ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ВОДНОЙ СРЕДЫ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ТУРБУЛЕНТНЫМ МАССООБМЕНОМ

© 2024 г. В. В. Герасимов*, А. Г. Зацепин**

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия***e-mail: gerasimov.vv@ocean.ru,****e-mail: zatsepin@ocean.ru*

Дата поступления 19.02.2024 г.

После доработки 27.03.2024 г.

Принята к публикации 18.04.2024 г.

Описаны и проанализированы результаты лабораторного эксперимента, выполненного с целью проверки фундаментального механизма тонкоструктурного расслоения стратифицированной жидкости при ее турбулентном перемешивании. Проведена серия опытов с перемешиванием водной среды с изначально линейным вертикальным градиентом солености колеблющимися вертикальными стержнями, создающими однородное турбулентное воздействие по всей толщине водного слоя. При этом в каждом опыте выполнялись регулярные измерения профилей электропроводности (солености) и проводились расчеты вертикального потока соли (массы). Оказалось, что при достаточно большом градиенте плотности (солености) поток массы является убывающей функцией градиента плотности, а это является основным условием формирования тонкой структуры, согласно предложенному механизму. Результаты опытов подтвердили его реалистичность и реализуемость. Установлена также зависимость вертикального масштаба тонкой структуры от параметров стратификации и турбулентного воздействия.

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, линейная плотностная стратификация, вертикально однородное турбулентное воздействие, числа Ричардсона и Рейнольдса, поток массы, тонкоструктурное расслоение, механизм Филлипса-Посментьера

DOI: 10.31857/S0030157424050013, EDN: OGEWIB

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что стратификация вод океанов и морей практически никогда не бывает “гладкой” и характеризуется наличием тонкой структуры (ТС), выражающейся в чередовании слоев и прослоек с различными значениями вертикальных градиентов характеристик (температуры, солености, плотности и др.). Вертикальные масштабы ТС составляют от одного до нескольких десятков метров, а горизонтальные — в 10^2 – 10^4 раз больше [7]. ТС характеризуется либо наличием слоев с пониженными вертикальными градиентами температуры, солености и плотности, разделенных высокоградиентными прослойками (ступенчатая структура), либо слоями с инверсиями температуры и солености (инверсионная, или интрузионная структура) [2]. При этом инверсией считается изменение знака градиента вышеуказанных параметров на противоположный по сравнению с фоновым.

Принято считать, что ступенчатая ТС является либо продуктом вертикального перемешивания вод — “необратимая” форма расслоения, либо порождена кинематическим эффектом многомодовых внутренних волн — “обратимая” форма расслоения [7]. Инверсионную структуру чаще всего связывают с квазиизопикническими интрузионными процессами на термохалинных фронтах [8]. Тем не менее, интрузионный процесс вовсе не обязательно связан с фронтами: любое локальное перемешивание стратифицированных вод порождает интрузию [1, 4, 3]. Один из первооткрывателей ТС вод океана К.Н. Федоров считал, что необратимая ТС вод океана является своеобразным почерком процессов перемешивания его стратифицированных вод как по вертикали, так и по горизонтали [7, 8]. Иногда этот почерк бывает каллиграфическим: при этом образуется “регулярная” ТС, состоящая из системы квазиоднородных слоев, разделенных резкими плотностными

границами. Примеры таких структур содержатся в указанных выше монографиях К.Н. Федорова, а также во многих статьях, посвященных изучению ТС в океанах и морях. Отметим, что ТС вод океана интенсивно изучалась, в особенности в 60-х — 80-х годах прошлого века, а затем интерес к исследованию этого явления снизился, хотя механизмы формирования ТС до сих пор являются недостаточно изученными.

Среди механизмов, формирующих регулярную ступенчатую ТС вод океана, наиболее распространенным является дифференциально-диффузионная конвекция [6, 16], однако можно полагать, что тип перемешивания — дифференциально-диффузионная конвекция или механически генерируемая турбулентность — не должен оказывать решающего влияния на конечный результат: преобразование изначально “гладкого” профиля плотности в ступенчатую структуру. В самом деле, данные лабораторного моделирования показывают, что однородное по вертикали турбулентное перемешивание при больших значениях числа Ричардсона (сильная стратификация) трансформирует изначально гладкие вертикальные профили плотности к ступенчатому виду [17, 12, 11]. Близкие результаты были также получены путем математического и численного моделирования [10, 9].

Объяснение причины тонкого расслоения пикноклина при механическом турбулентном перемешивании было предложено Филлипсом и Посментьером и описано в их работах [14, 15]. Оно заключается в неустойчивости вертикального турбулентного обмена в стратифицированной жидкости.

В течении стратифицированной жидкости (СЖ) со сдвигом скорости вертикальный турбулентный поток массы Q обычно представляют в виде

$$Q = -K(\partial\rho/\partial z). \quad (1)$$

Здесь $\partial\rho/\partial z$ — вертикальный градиент плотности, а K — коэффициент вертикального турбулентного обмена, который не является константой, а зависит от числа Ричардсона:

$$Ri = (g/\rho)(\partial\rho/\partial z)/(\partial u/\partial z)^2. \quad (2)$$

Здесь g — ускорение свободного падения, ρ — плотность жидкости, $\partial u/\partial z$ — вертикальный градиент скорости течения (ось z направлена вертикально вниз). Поскольку стратификация подавляет турбулентность, логично допустить, что K есть убывающая степенная функция Ri :

$$K \sim CRi^{-n}, \text{ где } n > 0. \quad (3)$$

Если $n > 1$, то из (1)–(3), следует, что модуль потока массы $|Q|$ является убывающей функцией

градиента плотности $\partial\rho/\partial z$. Это означает, что если где-то в потоке $\partial\rho/\partial z$ локально увеличивается, то $|Q|$ через эту область — уменьшается (при условии постоянства градиента скорости), в результате чего градиент плотности увеличивается еще больше. Данная ситуация свидетельствует о неустойчивости: малое отклонение системы от равновесного состояния приводит к дальнейшему росту этого отклонения. При этом поток стремится разбиться на однородные турбулентные слои, разделенные резкими ступеньками с большим градиентом плотности, через которые обмен затруднен. Такой тип турбулентного перемешивания СЖ можно охарактеризовать как “аномальный”, в котором тонкоструктурное расслоение является естественным состоянием турбулентной СЖ.

При $n < 1$ неустойчивость отсутствует, локальные неоднородности градиента плотности рассасываются, так как $|Q|$ является возрастающей функцией $\partial\rho/\partial z$. Этот тип турбулентного перемешивания является “нормальным”, при котором долгоживущее расслоение СЖ не возникает.

С целью экспериментальной проверки механизма тонкоструктурного расслоения СЖ Филлипса—Посментьера были проведены опыты с перемешиванием водной среды с изначально линейным вертикальным распределением солёности колеблющимися вертикальными стержнями, создающими однородное турбулизирующее воздействие по всей толщине водного слоя. При этом регулярные измерения профилей солёности и расчеты вертикального потока соли (массы) позволяют определить его зависимость от вертикального градиента солёности (плотности) при различных значениях числа Ричардсона, сконструированного с использованием вертикального градиента плотности, характерной скорости колебания стержней и их диаметра. Исследование зависимости вертикального потока массы от ее вертикального градиента (изначально постоянного по глубине) при фиксированном и однородном по вертикали турбулентном воздействии и выявление взаимосвязи появления слоистой структуры с характером этой зависимости имеет новизну по сравнению с ранее проводившимися исследованиями.

Ранее авторы, используя ту же методику перемешивания водной среды колеблющимися вертикальными стержнями, проводили опыты с изначально двуслойной солёностной стратификацией [19]. Было установлено, что при достаточно больших начальных значениях числа Ричардсона граница раздела продолжает оставаться резкой до тех пор, пока убывающее в процессе перемешивания число Ричардсона не становится меньше

критического значения. После этого граница раздела начинает быстро расширяться, а стратификация из двуслойной превращается в непрерывную. В режиме резкой границы раздела показатель степени в зависимости (3) $n > 1$, тогда как в режиме расширяющейся границы раздела $n < 1$, что согласуется с механизмом Филлипса—Посментьера.

Опыты с перемешиванием изначально двуслойной стратификации можно рассматривать как исследование перехода от ступенчатой структуры вертикального распределения плотности к ее непрерывному распределению, т.е. как исследование условий разрушения тонкой структуры. Опыты с перемешиванием изначально линейной стратификации следует рассматривать как исследование условий формирования тонкой структуры. Описанию этого эксперимента и его результатов посвящена данная работа.

Статья состоит из четырех разделов. После Введения следует раздел с описанием экспериментальной установки, методики проведения опытов и обработки данных. Затем следует раздел, в котором приводятся основные результаты опытов. В заключительном разделе содержится их обсуждение, сопоставление с результатами других исследований и делаются предварительные выводы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Опыты проводились на лабораторной установке, использовавшейся в эксперименте [19]. Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. Здесь (1) — экспериментальный бассейн

с внутренним размером $36 \times 13.5 \times 25$ см³, изготовленный из оргстекла толщиной 1.0 см. Сверху бассейна, на осциллирующем по горизонтали штоке (3), расположен над бассейном посередине вдоль его длинных сторон, с шагом 3.5 см закреплена система из 6 решеток (2), состоящих из вертикальных стеклянных стержней диаметром 0.6 см с расстоянием друг относительно друга 2.8 см. Длина погружаемой в жидкость части стеклянных стержней — 23 см. Они погружены в воду от поверхности и почти до дна бассейна. Шток, на котором закреплены решетки со стержнями, присоединен к электродвигателю постоянного тока с эксцентриком (4), обеспечивающим горизонтальное колебание штока и закрепленных на нем решеток со стержнями. Изменяя напряжение питания на двигателе, можно варьировать период T колебаний решеток в диапазоне от 1.3 до 6.7 с. Изменение точки закрепления штока на эксцентрике позволяет варьировать амплитуду колебаний решеток в пределах от 0.5 до 1.8 см.

Перед проведением опытов бассейн заполнялся равномерно стратифицированной по солености жидкостью с помощью двухбаковой системы (рис. 2). Левый бак (2) заполнялся водным раствором NaCl с заданной соленостью S_{20} , правый (1) — пресной дистиллированной водой ($S_{10} = 0$). Вода в обоих баках имела температуру, близкую к комнатной. Баки представляли собой сообщающиеся сосуды и соединялись широкой трубкой с краном (5) через отверстия в дне. В правом баке находилась мешалка с тремя многолопастными пропеллерами на штоке, закрепленном на оси электромотора (3). Мешалка обеспечивала быстрое

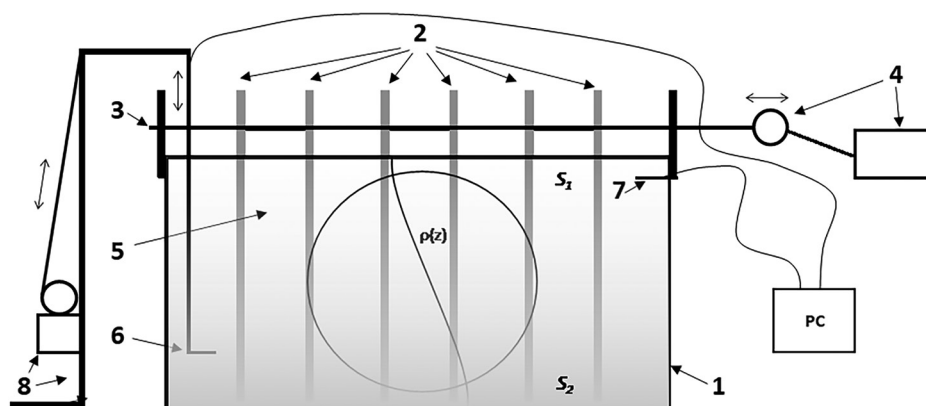


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — бассейн из оргстекла с внутренним размером $36 \times 13.5 \times 25$ см³; 2 — система решеток с вертикальными стержнями; 3 — шток, на котором закреплены решетки со стержнями; 4 — электродвигатель с эксцентриком, обеспечивающим горизонтальное колебание штока; 5 — линейно стратифицированная по солености водная среда; 6 — микродатчик электропроводности для измерения профиля солености; 7 — датчик электропроводности “Эксперт 002” в верхнем квазиоднородном слое; 8 — вертикальный лифт с электромотором для перемещения микродатчика электропроводности; PC — персональный компьютер для сбора измеряемых данных; S_1 — соленость верхнего слоя, $\rho(z) = \beta dS/dz$ — вертикальный градиент плотности, β — коэффициент соленостного сжатия. Круг в центре бака соответствует очертааниям плоскопараллельного пучка света, создаваемого теневым прибором.

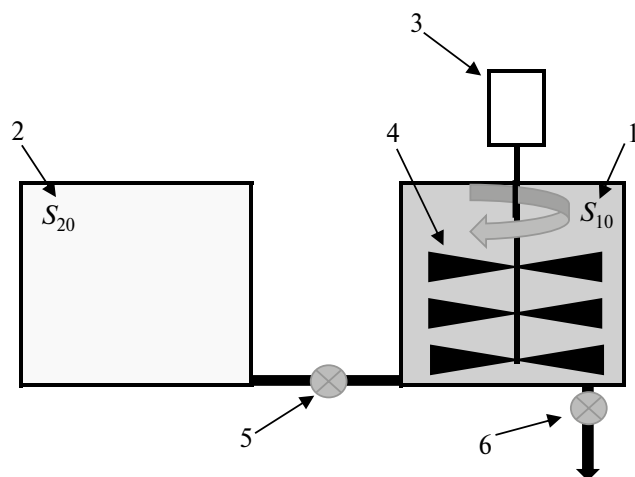


Рис. 2. Двухбачковая система для заливки линейно стратифицированной жидкости. 1 — правый бак с начальным раствором воды с нулевой соленостью $S_{10} = 0$, 2 — левый бак с водой с соленостью S_{20} , 3 — электромотор, 4 — мешалка, 5 — кран с трубкой, соединяющей баки, 6 — кран с трубкой, соединяющей правый бак с бассейном.

перемешивание поступающей из левого бака соленой воды по всему объему более пресной воды в правом баке. В дне правого бака, ближе к правой боковой стенке, находился выток с краном и трубкой (6), соединенной с втоком в экспериментальный бассейн, расположенном в центре его дна. Баки находились существенно выше бассейна на одном и том же уровне. Высота столба пресной воды в правом баке рассчитывалась таким образом, чтобы уравнивать высоту столба водного раствора соли в левом баке при открытом кране между баками и закрытом кране вытока в бассейн. Одновременно с открытием крана вытока включалась мешалка, и пресная вода из правого бака начинала поступать снизу в бассейн, а соленая вода из левого бака — гидравлическим образом поступать в правый, где она интенсивно перемешивалась с пресной. Таким образом, по мере заполнения бассейна в него поступала все более соленая вода. При небольшом расходе поступавшей в бассейн воды и благодаря тонкому диску, расположенному на небольшом расстоянии (менее 1 см) над областью втока, подавлявшем вертикальную скорость струи, заполнение происходило квазиламинарным образом. В результате создавалась квазилинейная соленостная стратификация с близкой к нулю соленостью воды S_{10} из правого бака — сверху и с близкой к солености S_{20} воды из левого бака — снизу.

После создания квазилинейной соленостной стратификации выжидалось время (1–2 часа), за которое все движения воды в нем затухали, а небольшие неоднородности структуры поля соле-

ности сглаживались. Опыт начинался с момента включения электродвигателя, обеспечивающего синусоидальное колебание решеток стержней вдоль длинной стороны бассейна с заданными амплитудой и периодом. В ходе опыта, с помощью лабораторного кондуктометра “Эксперт-002” (<https://magazinlab.ru/konduktometr-jekspert-002.html>), измерялась соленость в верхнем слое воды, которая постепенно увеличивалась за счет поступления соли из нижнего слоя в результате турбулентного обмена. Четырехэлектродный датчик кондуктометра “Эксперт-002” ((7) на рис. 1) без внешнего защитного пластикового чехла располагался в верхнем слое горизонтально на расстоянии 1.5 см от поверхности воды в бассейне. Измерение электропроводности воды этим датчиком проводилось от начала до конца опыта с периодом 1 с.

Наряду с измерением солености в верхнем слое с помощью кондуктометра “Эксперт-002” проводились измерения ее распределения по вертикали во всей толще жидкости с помощью одноэлектродного микродатчика электропроводности ((6) на рис. 1), равномерно перемещавшегося по вертикали с помощью автоматического лифта ((8) на рис. 1). Диаметр электрода датчика составлял 0.1 мм, частота импульсов — 0.001 с, скорость его перемещения по вертикали — 0.5 см/с, а толщина слоя жидкости в бассейне — 22.5 см. Таким образом, были получены профили электропроводности (солености) по вертикали с высоким разрешением. Период между двумя последовательными измерениями профиля солености составлял около трех минут (170 с). Каждый опыт проводился до того момента времени, когда водный слой в бассейне достигал полной однородности по солености.

Следует отметить, что перед началом каждой серии опытов датчики электропроводности калибровались путем их погружения в пластиковые стаканы, заполненные водой заданной солености. Первоначально соленость воды в стаканах задавалась весовым методом, а затем определялась с точностью 0.01 ppt с помощью австралийского лабораторного солемера “Autolab”. Погрешность измерений солености кондуктометром “Эксперт-002” не превышала 2% измеряемой величины. Данные измерения солености одноэлектродным датчиком привязывались к одновременным показаниям кондуктометра “Эксперт-002”. Следует отметить, что хотя стабильность измерения солености одноэлектродным микродатчиком и была довольно высокой, иногда наблюдались “скачки” в его показаниях. В таких

случаях сопоставление в верхнем слое с показаниями кондуктометра “Эксперт-002” позволяло восстанавливать абсолютные значения солёности в верхней части профилей.

Данные измерений поступали на интерфейс персонального компьютера (PC) и записывались в соответствующие файлы.

Дополнительно к описанным выше количественными измерениями, визуальная картина перемешивания и образования ступенчатой структуры воспроизводилась с помощью шлиреновского теневого прибора, позволявшего наблюдать и фотографировать картину распределения плотностных неоднородностей в круге диаметром 20 см по центру бассейна. Благодаря использованию теневого прибора удавалось следить за образованием и эволюцией квазиоднородных слоев ступенчатой структуры независимо от измерений вертикальных профилей солёности одноэлектродным датчиком.

Экспериментальные данные представлялись и анализировались в зависимости от безразмерных параметров — чисел Ричардсона и Рейнольдса. Эти параметры определялись следующим образом: число Рейнольдса $Re = \frac{Ud}{\nu}$, “турбулентное”

число Ричардсона $Ri = \frac{g\beta\Delta S d}{\rho U^2}$, где ν — кинематическая вязкость воды, d — диаметр стержня,

$U = \frac{4A}{T}$ — характерная скорость его колебания, A — амплитуда колебания, T — период колебания, g — ускорение свободного падения, β — коэффициент солёностного сжатия, ΔS — перепад солёности между приповерхностным и придонным слоями воды, ρ — плотность воды. Поскольку перепад солёности уменьшался от начального значения $\Delta S_0 \approx S_{20}$ до близкого к нулю в конце каждого опыта, величина турбулентного числа Ричардсона изменялись от максимального $Ri = Ri_0$ в начале опыта до $Ri \approx 0$ в конце опыта.

Значения основных размерных и безразмерных параметров эксперимента выбирались таким образом, чтобы в ряде опытов возникало ступенчатое расслоение изначально линейной солёностной стратификации, а в других стратификация так и оставалась непрерывной от начала перемешивания и до самого его конца.

Всего было проведено четыре серии опытов с различным набором значений параметров (каждая серия состояла из нескольких одинаковых опытов). В первой серии начальный перепад

солёности составлял $\Delta S_0 = 115$ ppm, амплитуда колебаний стержней $A = 1.2$ см, период колебаний $T = 2.5$ с ($Ri_0 = 13$, $Re = 115$). Во втором $\Delta S_0 = 86$ ppm, $A = 1.2$ см, $T = 2.5$ с ($Ri_0 = 9$, $Re = 115$). В третьем $\Delta S_0 = 65$ ppm, $A = 1.2$ см, $T = 3$ ($Ri_0 = 11$, $Re = 96$). В четвертом $\Delta S_0 = 41$ ppm, $A = 1.2$ см, $T = 3$ с ($Ri_0 = 5$, $Re = 96$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

В первых трех сериях опытов, раньше или позже, происходило формирование ступенчатой структуры, в четвертой серии опытов стратификация оставалась квазилинейной от начала процесса перемешивания до его окончания. При этом во всех опытах наблюдалось образование верхнего и нижнего перемешанных слоев вне зависимости от того, расслаивалась ли вся толща изначально линейно стратифицированной жидкости или нет. Появление этих квазиоднородных слоев связано с тем, что потоки соли как через верхнюю свободную поверхность жидкости, так и через твердое дно бассейна равны нулю. Для того чтобы обеспечить выполнение этого условия, градиент солёности в водном слое вблизи поверхности и дна должен быть равен нулю, что достигается путем образования приповерхностного и придонного перемешанных слоев. Изменяя изменение солёности в каждом из этих слоев во времени, а также положение солёностных границ раздела между этим слоями и нижележащим/вышележащим (соответственно) стратифицированным водным слоем, можно оценить вертикальный поток солёности через весь стратифицированный водный слой, если считать, что он непрерывен по вертикали.

Рассмотрим эту задачу для приповерхностного перемешанного слоя (ППС) с солёностью S_1 , увеличивающейся со временем t . Предположим сначала, что его толщина H_1 не изменяется со временем. В этом случае поток солёности Q_s , входящий снизу в этот слой, будет определяться следующим образом:

$$Q_s = -KG_s = -H_1 \partial S_1 / \partial t. \quad (4)$$

Здесь K — коэффициент вертикального турбулентного обмена массой, G_s — вертикальный градиент солёности в стратифицированном слое.

Из (4) легко получить выражение для K :

$$K(t) = H_1 (\partial S_1 / \partial t) / G_s. \quad (5)$$

Все параметры, входящие в правую часть (5), измеряются в опытах и, используя эту формулу, можно вычислить $K(t)$. На практике, однако, $H_1 \neq \text{const}$, а увеличивается со временем за счет

вовлечения в ППС воды из нижележащего стратифицированного слоя. Учет этого фактора приводит к следующему выражению для потока солености Q_s :

$$Q_s = -\partial(H_1 S_1)/\partial t + S_1(\partial H_1/\partial t). \quad (6)$$

Формулу (6) можно упростить, используя формулу для производной от произведения функций:

$$Q_s = -\partial(H_1 S_1)/\partial t + S_1(\partial H_1/\partial t) = -S_1(\partial H_1/\partial t) - H_1(\partial S_1/\partial t) + S_1(\partial H_1/\partial t) = -H_1(\partial S_1/\partial t). \quad (7)$$

Если представить (6) не в дифференциальном виде, а в виде конечных приращений, учитывая то обстоятельство, что все измерения дискретны во времени, получим

$$Q_s = -\langle H_1 \rangle \Delta S_1 / \Delta t. \quad (8)$$

Здесь ΔS_1 — разница между значениями, а $\langle H_1 \rangle$ — среднее значение толщины ППС для двух последовательных измерений профиля солености через промежуток времени Δt .

Для расчета Q_s по формуле (8) использовались значения солености S_1 , измеренной четырехэлектродным датчиком “Эксперт-002”, расположенном в ППС, а и $\langle H_1 \rangle$ определялись, исходя из профилей солености, измеряемых одноэлектродным микродатчиком электропроводности.

Как уже указывалось выше, в первой, второй и третьей сериях опытов наблюдалось расслоение изначально непрерывно стратифицированной водной среды, а в четвертой, характеризовавшейся наименьшим начальным значением турбулентного числа Ричардсона, водный слой оставался непрерывно стратифицированным на протяжении всего опыта.

Пример опыта, в котором в ходе перемешивания наблюдалось формирование квазиоднородных слоев, разделенных резкими соленостными (плотностными) границами (прослойками) раздела, показан на рис. 3.

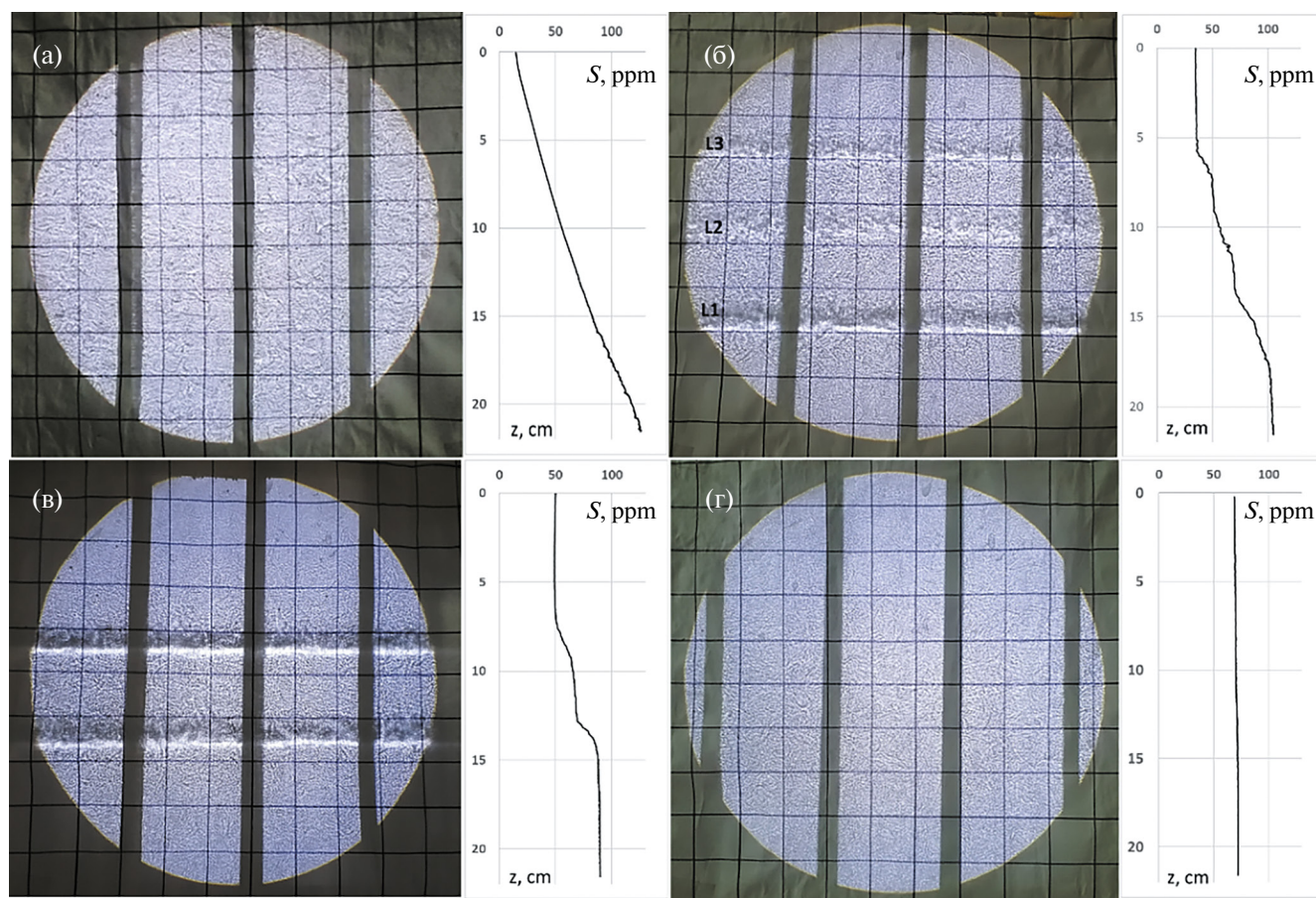


Рис. 3. Теневые фотографии (а–г) последовательного формирования и исчезновения ступенчатой структуры в процессе турбулентного перемешивания изначально линейно стратифицированной по солености жидкости. Рядом с фотографиями изображены соответствующие профили солености, полученные с помощью микроэлектродного датчика электропроводности. Яркие полосы — прослойки с большим градиентом плотности/солености, разделяющие слои с квазиоднородной плотностью/соленостью. Опыт при $Ri_0 = 13$, $Re = 115$.

На рис. 4 представлен в подробном виде профиль солёности при наличии расслоения с выделением квазиоднородных слоев и обозначением их толщин, в том числе, толщины первого, приповерхностного слоя, параметры которого и их временные изменения использовались для расчета вертикального потока солёности, вернее, его модуля $|Q_s|$. В дальнейшем будем обозначать модуль потока солёности просто как Q_s .

Далее, вместо использования потока солёности, мы будем использовать поток массы/плотности $Q = \beta Q_s$. Кроме того, вместо расчета K (коэффициента вертикального турбулентного обмена массой) и определения его зависимости от текущих значений числа Ричардсона, мы будем анализировать зависимость потока массы Q от вертикального градиента плотности $\langle G_\rho \rangle = \beta \langle G_s \rangle$ в каждом опыте отдельно. Обоснованием такому подходу служит то обстоятельство, что расчет $K = Q / \langle G_\rho \rangle$ содержит дополнительную ошибку измерения, связанную с неточным определением $\langle G_s \rangle$ по профилям солёности одноэлектродным датчиком на одной вертикали. Эта неточность обусловлена сильной флуктуацией локально определенных значений градиента солёности за счет турбулентности и внутренних волн. Предпочтительность поиска зависимости Q от $\langle G_\rho \rangle$ связана с тем, что в каждом отдельном опыте число Ричардсона изменяется только за счет изменения вертикального градиента плотности, так как характеристики стержней и их колебания остаются неизменными.

Данные анализировались с целью установления степенной зависимости Q от $\langle G_\rho \rangle$ в виде

$$Q \sim \langle G_\rho \rangle^{-k}. \quad (9)$$

Ставилась задача определения значения показателя степени k , который связан с показателем степени n в зависимости (3) следующим образом: $k = n - 1$. Соответственно, условие формирования ступенчатого расслоения по Филлипсу–Посментьеру соответствует значениям $k > 0$, а условие отсутствия расслоения соответствует значениям $k < 0$.

Действительно, в опытах с тонкоструктурным ступенчатым расслоением водной среды, наблюдавшемся при большом начальном линейном градиенте солёности, обнаружен различный характер поведения вертикального потока массы в зависимости от текущего значения вертикального градиента плотности.

На рис. 5 приведены экспериментальные точки и аппроксимирующие линии зависимости логарифма потока массы (плотности) от логарифма градиента плотности для этапов образования, эволюции и разрушения тонкой структуры. На первом этапе, когда происходит образование устойчивых во времени слоев, поток растет с уменьшением градиента, т.е. $k > 0$. На втором этапе происходит трансформация слоев, их количество уменьшается за счет слияния, при этом $k < 0$. Третий этап наступает после разрушения слоистой системы и восстановления квазилинейной

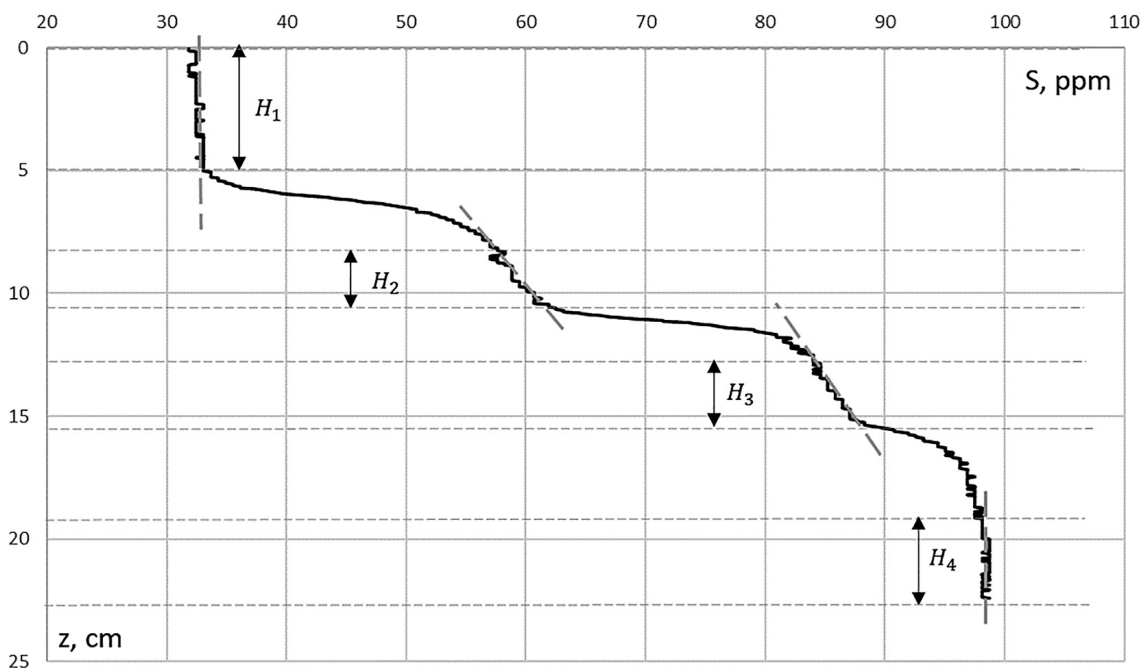


Рис. 4. Ступенчатый профиль солёности. Принцип выделения толщины верхнего перемешанного слоя, определение его толщины H_1 и толщин других квазиоднородных слоев.

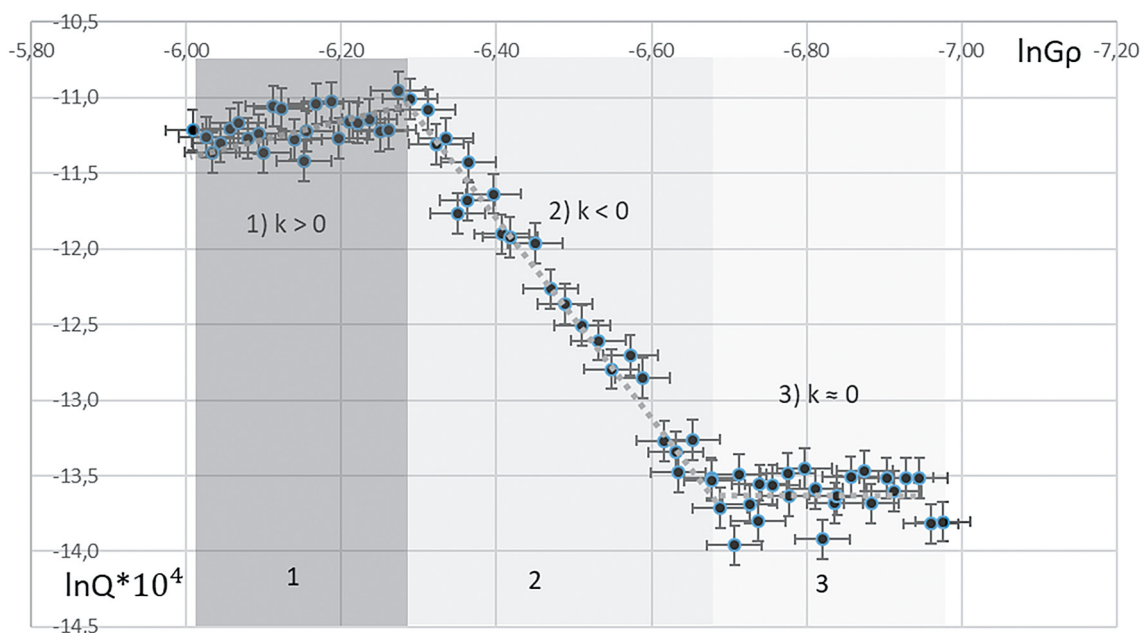


Рис. 5. Зависимость логарифма модуля потока массы Q от логарифма градиента плотности Gr . Опыт с начальными значениями $Ri_0 = 13$, $Re = 115$. Зоны, выделенные различными оттенками серого, соответствуют различному количеству высокоградиентных прослоек: 3, 2 и 1.

стратификации, при этом поток практически не зависит от градиента: $k \approx 0$.

Строго говоря, использование критерия Филлипса-Посментьера правомерно только до начала формирования ступенчатой структуры, когда плотностная стратификация является квазилинейной. В этом случае можно считать вертикальный поток массы постоянным по вертикали и определять его по изменению солёности и толщины ППС. После расслоения это условие нарушается и поток массы значительно изменяется по вертикали: в квазиоднородных слоях он больше, чем в высокоградиентных прослойках между ними.

Последовательно наблюдается образование и эволюция слоистой структуры (высокоградиентных слоев жидкости): область 1 — формирование 3-х ступенек, далее происходит процесс постепенной деградации слоистой структуры — переход к 2-ступенчатой структуре и затем к одной ступеньке вплоть до образования линейного градиента, а затем и практически полного перемешивания жидкости.

Рис. 5 показывает четкую корреляцию между наличием градиентной структуры и знаком k . Период образования 3-слойной структуры соответствует $k > 0$, следующая область — исчезновение одного слоя и переход в 2-ступенчатую структуру соответствует $k < 0$, и преобразование ступенчатой структуры в квазилинейную соответствует $k \approx 0$, что означает, что убывание градиента плот-

ности компенсируется возрастанием коэффициента турбулентного обмена.

Как уже было сказано выше, в 3-х сериях опытов наблюдалось образование нескольких высокоградиентных прослоек — ступенек. На рис. 6 приведена зависимость градиента солёности в высокоградиентных прослойках в зависимости от времени для опыта с $Ri_0 = 13$, $Re = 115$. Видно, что в формирующейся прослойке сначала наблюдается увеличение градиента, которое продолжа-

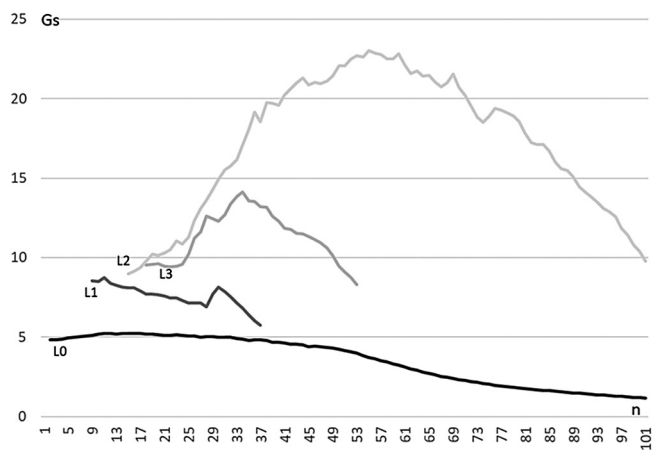


Рис. 6. Зависимость градиента плотности от времени (n — порядковый номер периода вертикального прохождения точечного датчика электропроводности) в последовательно образовывавшихся высокоградиентных слоях $L1$, $L2$, $L3$ и средний градиент плотности $L0$ между приповерхностным и придонным квазиоднородными слоями.

ется до определенного момента, затем градиент уменьшается. После разрушения прослойки соседние квазиоднородные слои объединяются, одновременно с разрушением слоев уменьшается средний градиент плотности во всем слое жидкости.

Эволюция плотностной стратификации в опыте без образования ступенчатой структуры показана на рис. 7. Рядом с фотографиями представлены соответствующие профили солёности. Из этого рисунка видно, что процесс перемешивания (уменьшения вертикального градиента плотности) происходит при сохранении квазинепрерывного градиента плотности.

На рис. 8 представлена зависимость логарифма модуля потока массы (плотности) от логарифма градиента плотности для опыта без образования ступенчатой структуры. Видно, что сколько-нибудь продолжительных участков графика с $k > 0$ не наблюдается, а превалирует зависимость с $k < 0$, при которой расслоение не формируется в соответствии с механизмом Филлипса-Посментьера.

По данным, полученным в опытах, была оценена толщина промежуточных квазиоднородных слоев в зависимости от комбинации двух определяющих параметров: U и $N = [(g/\rho)\partial\rho/\partial z]^{0.5}$ — частота Вайсяля—Брента. Из этих параметров можно составить один параметр, имеющий размерность длины: U/N . Физический смысл этого параметра заключается в балансе генерации турбулентности движением стержней (числитель) и в ее подавлении плотностной стратификации (знаменатель). Для океанской среды впервые подобный параметр был введен Р.В. Озмидовым [5] как масштаб турбулентного перемешивания в устойчиво стратифицированной жидкости. Очевидно, что для образования ступенчатой структуры в изначально непрерывно стратифицированном водном слое при однородном турбулентном воздействии должно выполняться условие $H \ll H_0$, где $H \sim U/N$ — толщина формирующегося квазиоднородного слоя, а H_0 — толщина всего стратифицированного слоя.

На рис. 9 представлены данные измеренной толщины H слоев в данной работе совместно

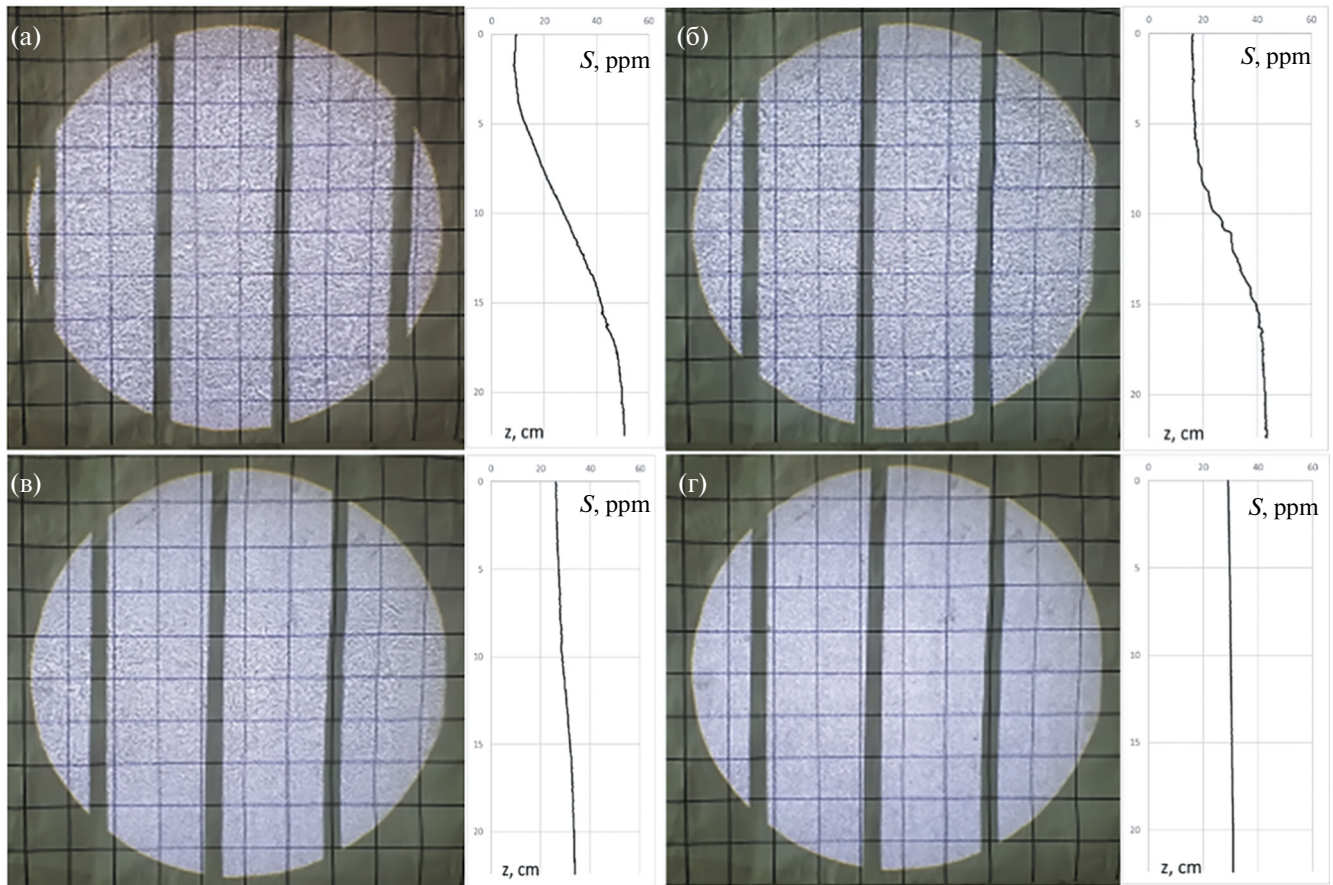


Рис. 7. Опыт с перемешиванием стратифицированной жидкости без образования ступенек при $Ri_0 = 5$, $Re = 115$. Снимок (а) — начало перемешивания, (б) — через 30 минут, (в) — через 90 минут, (г) — через 140 минут.

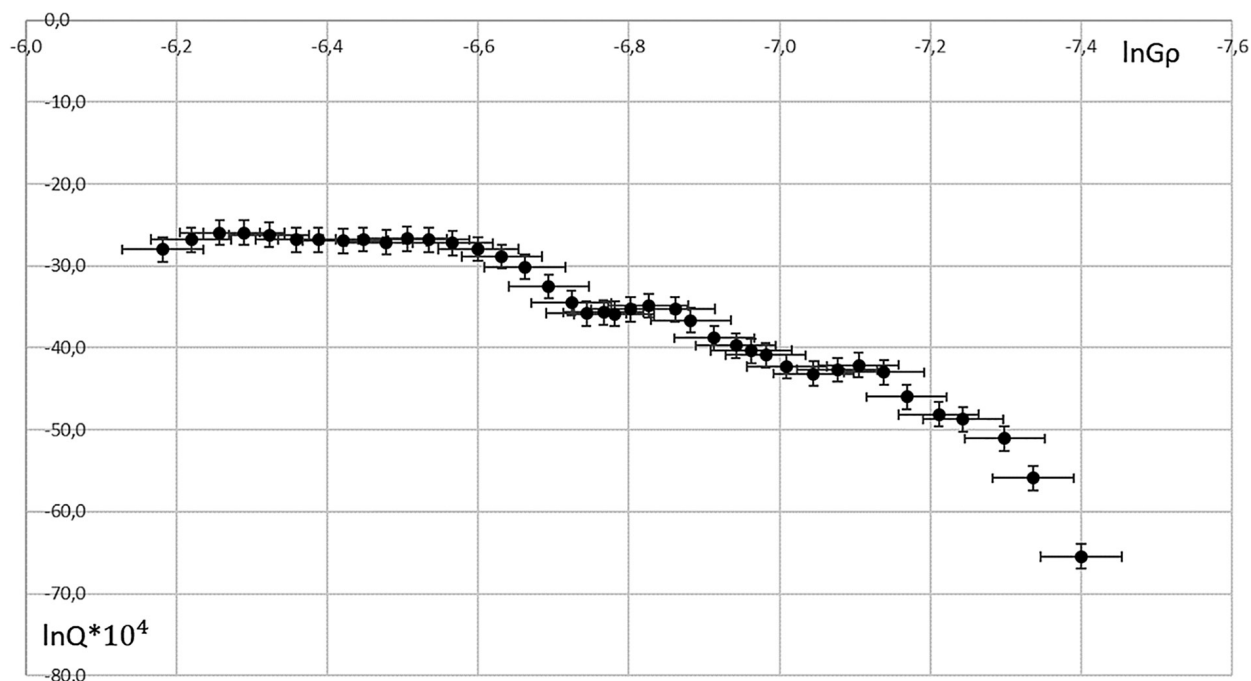


Рис. 8. Зависимость логарифма модуля потока массы Q от логарифма градиента плотности $\langle Gr \rangle$. Опыт при $Ri_0 = 5$, $Re = 96$.

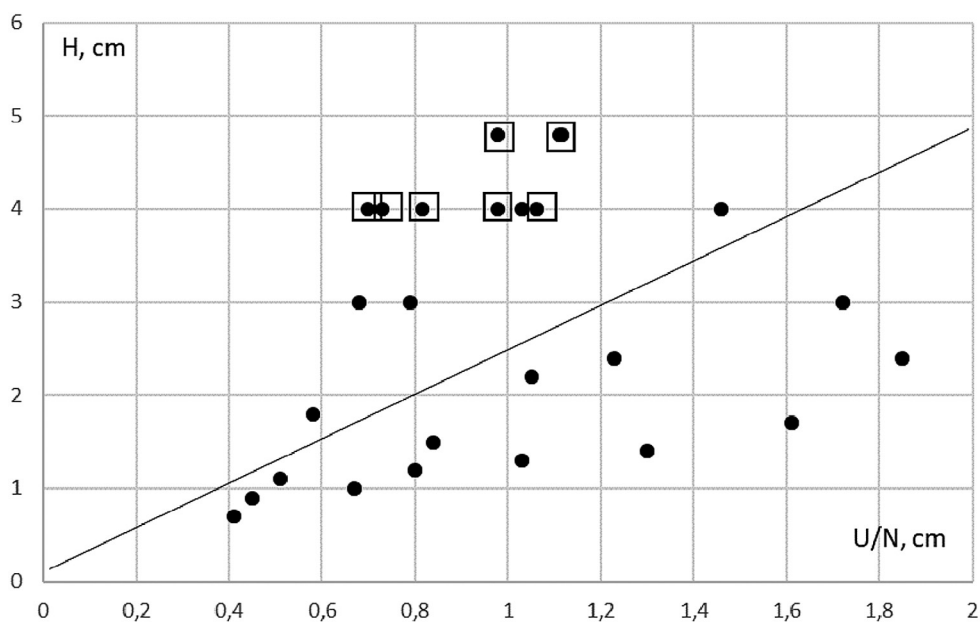


Рис. 9. Зависимость толщины H промежуточных квазиоднородных слоев от отношения скорости перемешивания U к частоте Вайсала—Брента N в данной работе (точки, обведенные квадратами) совместно с результатами аналогичных экспериментов, выполненных ранее. Прямая линия — линейная регрессия.

с аналогичными результатами экспериментов, выполненных ранее на такой же экспериментальной установке (см. [19]), в зависимости от U/N .

Линейная регрессия, рассчитанная по всем точкам, дает зависимость $H = 2,4 U/N$, однако коэффициент корреляции не является высоким (коэффициент корреляции $R = 0,25$). Очевидно,

что данная зависимость не является полностью автомодельной и зависит, по-видимому, как минимум от числа Рейнольдса. Поскольку в данных опытах характерная первоначальная толщина квазиоднородных слоев $H = 4\text{--}5$ см, при общей толщине слоя жидкости $H_0 = 22,5$ см, неравенство $H \ll H_0$ хорошо выполняется.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

Результаты описанных в статье опытов подтвердили, что образование ступенчатой структуры в изначально непрерывно стратифицированной водной среде при вертикально однородном турбулентном перемешивании происходит в соответствии с механизмом Филлипса—Посментьера [14, 15].

Экспериментально подтверждено, что вертикальный поток массы (плотности) по-разному зависит от величины вертикального градиента плотности, в зависимости от величины последнего при постоянном во времени и однородном по вертикали турбулентном воздействии. А именно, при большом градиенте плотности модуль потока массы/плотности Q является убывающей функцией градиента плотности $d\rho/dz$, и при этом происходит образование ступенчатой структуры, а при небольшом градиенте плотности модуль потока массы является возрастающей функцией градиента плотности, и при этом ступенчатая структура либо не образуется, либо разрушается, если была сформирована ранее. Соответственно, для коэффициента вертикального турбулентного потока массы K при его представлении в виде степенной зависимости от числа Ричардсона $K \sim CRi^{-n}$, при образовании слоистой структуры в изначально линейно стратифицированном слое жидкости реализуется условие: $n > 1$, при $n < 1$ — расслоения линейно стратифицированной жидкости не происходит.

Важным условием возникновения расслоения является также неравенство $H \ll H_0$. В наших опытах это неравенство выполнялось, поскольку толщина перемешанных слоев $H \sim U/N$ (в первом приближении) была существенно меньше полной толщины слоя жидкости H_0 .

С позиции приложения результатов данного эксперимента к природным условиям можно возразить, что решеточная турбулентность не имеет отношения к стратифицированному океану, где перемешивание осуществляется в области сдвига скорости течения, порождаемого, в том числе, внутренними волнами. В оригинальной работе Пелигри и Сандра [13], в предположении, что турбулентное перемешивание стратифицированной среды происходит вследствие неустойчивости Кельвина—Гельмгольца (К—Г), развивающейся на скачках плотности, был предложен альтернативный механизм перемешивания стра-

тифицированных вод. По их представлению, максимальный вертикальный поток массы возникает в области максимального вертикального градиента плотности, а не в зоне уменьшения плотностного градиента, как в механизме Филлипса и Посментьера. В результате этого перемешивания в области начального скачка плотности образуется перемешанный слой, а новые плотностные границы формируются выше и ниже перемешанного слоя. В качестве экспериментального подтверждения данного механизма Пелигри и Сандра ссылаются на классический эксперимент Торпа [18] в наклонной герметичной трубе, заполненной двуслойно-стратифицированной жидкостью. Там, в результате формирования цепочки турбулентных К—Г вихрей вдоль всей длины трубы в области плотностной границы раздела и вызванного ими перемешивания, действительно происходило “расщепление” границы раздела и образование двух новых границ выше и ниже первоначальной.

При всей привлекательности данного механизма, его реализация в натуральных условиях требует выполнения, как минимум, двух условий. Во-первых, область развития неустойчивости Кельвина—Гельмгольца должна иметь большое горизонтальное простираие, для того чтобы процесс коллапса перемешанной области не “схлопнул” ее быстро. Во-вторых, турбулентность в этой области должна поддерживаться продолжительное время, для того чтобы возникла область хорошо перемешанной жидкости, ограниченная сверху и снизу резкими плотностными границами. Насколько часто такие условия реализуются в природе, пока неясно.

С другой стороны, представим себе, что во фронтальной зоне возникло интрузионное расслоение вод, не обязательно обусловленное дифференциально-диффузионной конвекцией. Тогда даже слабая и спорадическая турбулентность может обеспечить поддержание плотностных границ интрузий в обостренном состоянии ($Ri > Ri^*$) благодаря реализации механизма Филлипса—Посментьера. Присутствие сильной турбулентности ($Ri < Ri^*$), наоборот, будет разрушать вертикальную переслоенность вод. Нужны дополнительные исследования (лабораторные, численные, натурные), чтобы разобраться в этом сложном вопросе.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы госзадания FMWE-2024-0016.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баренблатт Г.И.* Динамика турбулентных пятен и интрузии в устойчиво-стратифицированной жидкости // Изв. АН СССР, ФАО. 1978. Т. 14. № 2. С. 195–206.
2. *Журбас В.М., Озмидов Р.В.* (ред.). Формы тонкой термохалинной структуры океана. Каталог // Материалы океанологических исследований. Выпуск 1. М.: Межведомственный геофизический комитет при Президиуме Академии Наук СССР, 1987. 134 с.
3. *Зацепин А.Г.* О коллапсе стратифицированных пятен // ДАН СССР. 1982. Т. 265. № 2. С. 460–463.
4. *Зацепин А.Г., Федоров К.Н., Воропаев С.И., Павлов А.М.* Экспериментальное исследование растекания перемешанного пятна в стратифицированной жидкости // Изв. АН СССР, ФАО. 1978. Т. 14. № 2. С. 234–237.
5. *Озмидов Р.В.* О турбулентном обмене в устойчиво стратифицированном океане // Изв. АН СССР. Физика атм. и океана. 1965. № 8. С. 853–859.
6. *Тернер Дж.* Эффекты плавучести в жидкости. М.: Мир, 1977. 430 с.
7. *Федоров К.Н.* Тонкая термохалинная структура вод океана. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 184 с.
8. *Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
9. *Balmforth N.J., Llewellyn Smith S.G., Young W.R.* Dynamics of interfaces and layers in a stratified turbulent fluid // J. Fluid Mech. 1997. V. 355. P. 329–358.
10. *Barenblatt G.I., Bertsch M., Dal Passo R. et al.* A mathematical model of turbulent heat and mass transfer in stably stratified shear flow // J. Fluid Mech. 1993. V. 253. P. 341–358.
11. *Dmitrenko I., Golovin P., Dehn J. et al.* Influence of sea ice on under-ice mixing under stratified conditions: potential impacts on particle distribution // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 1998. V. 46. № 4. P. 523–529.
12. *Park Y.-G., Whitehead J.A., Gnanadesikan A.* Turbulent mixing in stratified fluids: layer formation and energetics // J. Fluid Mech. 1994. V. 279. P. 279–311.
13. *Pelegri J.L., Sangra P.* A mechanism for layer formation in stratified geophysical flows // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103. № C13. P. 30, 679–30, 693.
14. *Phillips O.M.* Turbulence in a strongly stratified fluid: Is it unstable? // Deep Sea Res. Oceanogr. Abstr. 1972. V. 19. P. 7–81.
15. *Posmentier E.S.* The generation of salinity fine structure by vertical diffusion // J. Phys. Oceanogr. 1977. V. 7. P. 298–300.
16. *Radko T.* Double Diffusive Convection. Cambridge University Press. 2013. 344 p. ISBN 978-05-218-8074-9.
17. *Ruddick B.R., McDougall T.J., Turner J.S.* The formation of layers in a uniformly stirred density gradient // Deep-Sea Res. 1989. V. 36. P. 597–609.
18. *Thorpe S.A.* Experiments on the instability of stratified shear flow: miscible fluids // J. Fluid Mech. 1971. V. 46. № 2. P. 299–319.
19. *Zatsepin A.G., Gerasimov V.V., Ostrovskii A.G.* Laboratory study of turbulent mass exchange in a stratified fluid // J. Mar. Sci. Eng. 2022. V. 10. P. 756–774. <https://doi.org/10.3390/jmse10060756>

ON THE RELATION OF FINE LAYERING OF A STRATIFIED WATER ENVIRONMENT WITH VERTICAL TURBULENT MASS TRANSFER

V. V. Gerasimov*, A. G. Zatsepin**

Shirsov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: gerasimov.vv@ocean.ru,*

***e-mail: zatsepin@ocean.ru*

The results of a laboratory experiment performed to test the fundamental mechanism of fine layering of a stratified fluid during turbulent impact are described and analyzed. A series of experimental runs were carried out with stirring of an aquatic environment with an initially linear vertical salinity gradient using oscillating vertical rods, creating a uniform turbulent impact throughout the entire thickness of the water column. At the same time, in each run regular measurements of electrical conductivity (salinity) profiles were fulfilled and calculations of the vertical salt flux (mass) were carried out. It turned out that in case of a sufficiently large density (salinity) gradient the mass flux is a decreasing function of the density gradient, and this is the main condition for the formation of a fine layering, according to the proposed mechanism. The experimental results confirmed its feasibility. The dependence of the vertical scale of the fine structure on the parameters of stratification and turbulent impact has also been established.

Keywords: laboratory experiment, linear density stratification, vertically uniform turbulent impact, Richardson and Reynolds numbers, mass flux, fine-structure stratification, Phillips–Posmentier mechanism