

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

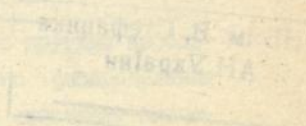
На правах рукописи  
УДК 551.465

КУЛЬША ОЛЕГ ЕВГЕНЬЕВИЧ

БОКОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОЦЕССАХ СТУПЕНЧАТОГО  
РАССЛОЕНИЯ ОКЕАНА

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
(04.00.22 - геофизика)

Севастополь  
1993





AB 27.247

Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте  
АН Украины.

Научные руководители: доктор физико-математических наук,  
профессор Н. А. Пантелеев  
доктор физико-математических наук  
В. М. Дурбас

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
В. В. Кынь  
кандидат физико-математических наук  
В. И. Никишов

Ведущая организация: Одесский гидрометеорологический  
институт АН Украины

Защита состоится "14" мая 1993 г. на заседании  
Специализированного совета Д 016.01.01 при Морском гидрофи-  
зическом институте АН Украины (335 000, г. Севастополь, ул.  
Капитанская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Морского  
гидрофизического института АН Украины (335 000, г. Севасто-  
поль, ул. Капитанская, 2).

Автореферат разослан "13" апреля 1993 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета  
доктор физико-математических наук

А. М. Суворов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Совершенствование знаний о тонкой стратификации вод Мирового океана за последние 2-3 десятилетия привело океанологов от осторожного признания реальности ее существования к осознанию того, что она присутствует в нем почти повсеместно. В настоящее время уже известно, что области регулярного ступенчатого расслоения главного термоклина способны охватывать собой акватории в миллионы квадратных километров [Schmitt et al, 1987]. Что касается временных масштабов явления, то установлено, что, например, в полузакрытом Тирренском море термохалинные ступеньки сохраняются по меньшей мере в течение 3-х лет [Molcard & Tait, 1977], а в условиях открытого океана - не менее 8 месяцев [Schmitt et al, 1987].

Тонкая термохалинная структура (ТТС) оказывает существенное влияние на ход многих явлений как меньших, так и больших пространственно-временных масштабов. К примеру, чередование слоев с относительно высокими и низкими вертикальными градиентами поля плотности создает предпосылки для возникновения картины пространственно перемежающейся мелкомасштабной турбулентности. С другой стороны, процессы вертикального и горизонтального обмена теплом и солью в более крупномасштабных образованиях Мирового океана (таких, как фронты, вихри и линаы) неизбежно проходят через стадию формирования тонкой структуры (ТС). Адекватная оценка вертикального теплообмена через океанский термоклин также невозможна без учета особенностей ТТС. Одним словом, мы должны научиться параметризовать влияние ТС на вертикальные и горизонтальные потоки тепла и соли.

Имеется множество примеров связи ТТС и с другими проблемами физики моря. Особенности вертикального распределения скорости звука в термохалинных ступеньках оказывают значительное влияние на его горизонтальное распространение, и

знание этих особенностей может оказаться важным при разработке методов подводной локации. Влиянию тонкой стратификации подвержено и распространение внутренних волн. Существуют свидетельства того, что поле внутренних волн сильно подавляется ступеньками [Gregg, 1989; Padman, 1991]. Прохождение света через толщу вод океана также может испытывать на себе влияние ТС поля плотности, особенно когда на устойчивых поверхностях раздела или в линзах интрузионных вод скапливаются фитопланктон, мелкие морские организмы и детрит.

В силу ряда причин в течение долгого времени влияние горизонтальных неоднородностей термохалинных полей на формирование ступенчатой тонкой структуры (СТС) недооценивалось исследователями. В частности, лишь сравнительно недавно стали проводиться систематические измерения ТС фронтальных зон, и привлечение внимания к этой проблеме диктуется необходимостью дальнейшей детализации современной физической концепции фронтов и фронтальных зон Мирового океана. Таким образом, натурные исследования СТС в условиях сильной горизонтальной термохалинной изменчивости являются сейчас интенсивно развивающейся частью физики моря, в связи с чем теоретическое объяснение обширного экспериментального материала не всегда поспевает за ними. Этим и обосновывается актуальность данной работы.

#### Цель работы.

Настоящая работа посвящается фундаментальной проблеме выявления механизмов генерации важного типа термохалинной ТС - ступенчатой тонкой структуры, а также некоторым аспектам ее эволюции. Ее целью является дальнейшее развитие существующих в этой области представлений.

Основными задачами исследования являлись:

- выяснение роли различных структурообразующих факторов, обусловленных той или иной гидрологической ситуацией в тех районах океана, где наблюдается СТС;
- доказательство существования тесной связи между двумя основными классами ТС - интрузионным и ступенчатым - и осно-

ваннсе на численном моделировании подтверждение гипотезы о генерации СТС главного термоклина за счет трансформации интрузионной структуры;

- обоснование возможности ступенчатого расслоения невозмущенных областей путем распространения уже существующих систем термохалинных ступенек вширь, анализ специфики этого процесса, вносимой эффектами двойной диффузии, и уточнение существующей модели явления;

- экспериментальное и теоретическое исследование явления формирования термохалинных инверсий в квазиоднородных слоях СТС, построение модели, объясняющей действие механизма формирования инверсий, и выяснение роли ступенчатых структур в горизонтальном переносе тепла и соли, связанного с этим механизмом.

#### Научная новизна и практическая ценность.

Как отмечалось выше, процессы формирования и эволюции СТС фронтальных зон еще не нашли своего адекватного отражения в теории. Это прежде всего касается учета горизонтального фактора в моделировании ступенчатых структур, который и осуществляется в данной работе. Ниже отметим ее основные новые результаты.

В численном эксперименте впервые воспроизведен процесс переформирования интрузионной ТС в ступенчатую и найдены необходимые условия его осуществимости. Получила свое дальнейшее развитие модель распространения вширь областей ступенчатого расслоения океана, что позволило более точно описать закономерности этого процесса. Экспериментально обнаружена и теоретически обоснована одна из возможных причин появления термохалинных инверсий в квазиоднородных слоях ступенчатых структур. В работе также исследована роль СТС в осуществлении горизонтального тепломассопереноса и получены оценки эффективного коэффициента квазигоризонтального обмена теплом и солью.

Результаты, полученные в диссертации, углубляют и расширяют концепцию формирования СТС в результате взаимного

приспособления вод с различными Т, S- характеристиками и могут быть полезными в решении проблем параметризации обменных процессов, имеющих место во фронтальных зонах океана.

#### Апробация результатов.

Основные результаты работы докладывались на третьем Всесоюзном симпозиуме "Тонкая структура и синоптическая изменчивость морей и океанов" (Таллинн, 1990 г.), на объединенных коллоквиумах лаборатории морской турбулентности и отдела экспериментальной и космической океанологии ИО АН России (Москва; 1985-1990 гг.), на научных семинарах отдела турбулентности МГИ АН Украины (Севастополь, 1986-1993 гг.).

#### Публикации.

По теме диссертации опубликовано 5 работ, список которых приведен в конце реферата.

#### Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 124 наименований и содержит 144 страниц, включающих 21 рисунок.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность темы, сформулированы цели исследования, приведены основные научные результаты с указанием на их новизну и кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава вводит читателя в круг исследуемых проблем, знакомит его с двумя основными типами термохалинной ТС: интрузионным и ступенчатым. В ней дается развернутое представление о различных физических механизмах, приводящих к образованию ТС. Основной ее целью было показать важную роль горизонтальных факторов (бюксовых эффектов), а именно горизонтальной термохалинной изменчивости и квазигоризонтальных движений интрузионного типа, в формировании и эволюции ступенчатых структур. В то же время в ней в стройной последовательности приводятся известные эмпирические факты и коли-

чественные закономерности, на которые автор опирается в дальнейшем изложении оригинального материала.

В первом параграфе раскрывается связь между фоновыми распределениями (как вертикальными, так и горизонтальными) термохалинных полей и особенностями формируемой на этом фоне ТС. Отмечается особая роль двойной диффузии (ДД) в формировании наиболее выраженной ТС океана, обусловленная тем, что процессы ДД являются уникальным механизмом эффективного высвобождения потенциальной энергии вертикального распределения компонента, вносящего дестабилизирующий вклад в плотностную стратификацию. В связи с этим в тексте главы специально выделен параграф (второй), дающий необходимые сведения из этой области.

В третьем параграфе рассматриваются конкретные механизмы генерации ступенчатой ТС, исследовавшиеся ранее другими авторами. Отмечается, что в формировании ступенчатой ТС главного термоклина с характерными толщинами квазиоднородных слоев порядка 10-100 м активно участвует двойная диффузия. Автор различает два возможных пути, по которым идет образование ступенчатых структур непосредственно процессами ДД. Первый из них - хорошо известное из ранних лабораторных экспериментов последовательное расслоение стратифицированной жидкости вверх и (или) вниз от единичного горизонтально однородного возмущения на вертикальных профилях температуры и солености, описываемое моделью Л. Н. Карлина с соавторами (1988). Условия для реализации подобного механизма генерации ТС в океане возникают, в частности, на верхних и нижних границах льда средиземноморских вод в Атлантике. Другая возможность образования ступенчатых профилей связывается с трансформацией интрузионной ТС главного термоклина солевыми пальцами. Одним из параметров, определяющих толщины формирующихся ступенек, в этом случае является характерный вертикальный размер интрузий, который, в свою очередь, зависит уже не только от вертикальной стратификации, но и от горизонтальной термохалинной структуры зоны интрузионного

расслоения. Поэтому далее кратко рассматривается теория неустойчивости термохалинного фронта (в отсутствии бароклинности), одним из результатов которой является указание конкретного вида вышеупомянутой зависимости.

В четвертом параграфе обсуждается роль боковых эффектов в процессах ступенчатого расслоения. Отмечается имеющееся на данный момент отставание в этой области, особенно в части теоретического анализа экспериментального материала. В качестве еще одного механизма ступенчатого расслоения рассматривается квазигоризонтальное распространение систем термохалинных ступенек в сторону невозмущенной стратифицированной жидкости аналогично процессу растекания одиночных перемешанных пятен, но с учетом эффектов ДД.

Во второй главе исследуется возможность трансформации интрузионной ТС главного термоклина в ступенчатую солевыми пальцами. Представлена нелинейная модель, описывающая эволюцию профилей температуры  $T$  и солености  $S$  интрузионного типа, аппроксимируемых в начальный момент синусоидальными возмущениями, наложенными на фоновые линейные распределения  $T$  и  $S$ , причем последние создают предпосылки для активного функционирования солевых пальцев. Амплитуды возмущений задаются таким образом, что профиль плотности остается линейным (это отражает приблизительно изопикнический характер движений, приводящих к начальному интрузионному расслоению). Действие конвективных процессов ДД в режиме солевых пальцев параметризуется путем задания зависимости эффективных коэффициентов вертикального обмена теплом и солью от локального плотностного соотношения подобно тому, как это делалось в [Schmitt, 1981]. В основу этой параметризации положены установленные в лабораторных экспериментах и натурными исследованиями закономерности тепломассопереноса процессами ДД, согласно которым обмен за счет солевых пальцев должен осуществляться наиболее интенсивно при значениях плотностного отношения

$$r = \frac{\alpha \partial T / \partial z}{\beta \partial S / \partial z} \quad (\alpha, \beta - \text{коэффициенты термического расширения})$$

ния и соленостного сжатия морской воды), приближающихся к единице, а отношение вертикальных потоков тепла и соли, представленных в единицах плавучести, есть примерно постоянная величина, меньшая единицы.

Модельная задача принципиально сводится к решению одного нелинейного уравнения параболического типа в диапазоне глубин, равном четверти периода интрузионного возмущения, и осуществлению процедуры мгновенного конвективного перемешивания в тех слоях, где за счет присущей солевым пальцам неравномерности в переносе тепла и соли появляются инверсии плотности. Для численного решения уравнения диффузии соли автором была реализована консервативная разностная схема сквозного счета первого порядка точности по времени и второго - по пространству. Алгоритм счета предварительно подвергался тестированию.

В задаче имеются два безразмерных определяющих параметра, задающих форму начальных интрузионных распределений температуры и солености: среднее плотностное отношение  $R$  и отношение амплитуды начального синусоидального возмущения профиля солености к изменению солености за счет среднего градиента на длине, равной периоду возмущения ( $A$ ). Путем решения модельной задачи до выхода на стационарный режим при различных определяющих параметрах было обнаружено, что для каждого фиксированного значения  $R$  существует некоторое критическое значение  $A = A'$ , разбивающее область всех возможных значений этого параметра на два интервала: 1) при  $A > A'$  в ходе решения образуются инверсии плотности и, следовательно, однородные участки на термохалинных профилях (решения I типа); 2) при  $A < A'$  ступенчатые профили не формируются (решения II типа). Найденное в проведенном численном эксперименте условие реализации гидростатической неустойчивости, заключающееся в том, что для критического решения в стационарном режиме локальное плотностное отношение в верхней граничной точке области интегрирования равно единице, позволило далее автору явно рассчитать зависимости вида  $A = f(R)$ , разделяющие всю

совокупность параметров  $A$  и  $R$  на две области, отвечающих решениям I и II типов. Полученный результат находится в согласии с эмпирически установленным фактом, что ступенчатое расслоение главного термоклина, как правило, осуществляется при относительно низких значениях среднего плотностного отношения.

В третьей главе исследуется механизм ступенчатого расслоения линейно стратифицированной области океана путем распространения вширь уже существующей регулярной системы ступенек. Рассматривается интегральная модель этого явления, в основе которой лежит подход, применявшийся ранее другими авторами при описании вязкой стадии коллапса одиночных пятен перемешанной жидкости в однокомпонентной стратифицированной среде. В динамике квазиоднородных слоев системы ступенек однако необходимо учитывать особенности, обусловленные двойной диффузией и присущей регулярным ступенчатым структурам квазипериодичностью по вертикали. В новой постановке возникают два основных момента, отличающих ее от обычных задач по вязкой стадии растекания перемешанных пятен: это вовлечение в квазиоднородный слой окружающей жидкости благодаря действию процессов ДД на границах раздела и иная параметризация силы сопротивления движению слоя. Такая модель впервые была предложена В. М. Журбасом (1989). Однако в ней в целях упрощения анализа полагалось, что входящая в уравнения задачи скорость вовлечения есть константа. В настоящей работе это ограничение было снято благодаря тому, что скорость вовлечения задавалась функцией от текущей толщины слоя довольно произвольного вида. Это потребовало от автора несколько иного подхода к решению получающейся автомоделной задачи. Помимо этого в диссертации применяется более корректная параметризация силы сопротивления движению языка перемешанной жидкости, чем ранее.

Важным результатом проведенного исследования явился вывод, что скорость бокового распространения системы ступенек не меняется при задании любого вида функциональной зависи-

мости скорости вовлечения от текущей толщины языка перемешанной жидкости, допускающего существование физически непротиворечивого решения с конечной шириной переходной зоны. В то же время ширина переходной зоны, отделяющей область, занятую ступеньками, от невозмущенной линейно стратифицированной среды, а также форма языков перемешанной жидкости в этой зоне определяются, помимо прочих параметров, конкретным видом указанной выше функции. Более корректная параметризация силы сопротивления также позволила уточнить полученное ранее решение рассматриваемой задачи.

Было проведено сравнение результатов модели с данными об эволюции ареалов ступенчатого расслоения в эксперименте C-SALT [Schmitt et al. 1987] (оценка скорости миграции границы области расслоения: 2-3 см/с) и эмпирическими оценками ширины зоны вырождения термохалинных ступенек для того же района измерений [Журбас, 1989] (порядка 10 км), подтверждающее их достоверность.

В четвертой главе исследуются причины появления в квазиоднородных слоях ступенчатых структур инверсий температуры и солености. Впервые представлена законченная математическая модель этого явления. Стимулом для ее появления послужил проведенный в 38 рейсе НИС "Академик Вернадский" в декабре 1988 г. при участии автора эксперимент, описываемый в первом параграфе главы. Работы проводились в северо-западной части тропической Атлантики (район эксперимента C-SALT) с помощью тонкоструктурного CTD-зонда "Комплекс-1" (разработка МГИ АН Украины) в области взаимодействия регулярной системы ступенек с термоклинным фронтом. Оказалось, что появление инверсий может быть объяснено имеющими в квазиоднородных слоях место разнонаправленными движениями жидкости при наличии продольных (вдоль слоя) градиентов температуры и солености. Сами эти движения обязаны своим происхождением наклону квазиоднородных слоев относительно горизонтали, причем, как следует из приведенного в диссертации

анализа, в верхней половине слоя скорость движения направлена в сторону заглубления, а в нижней - в обратную сторону, что отражает тенденцию к рестратификации поля плотности.

Моделльная задача включает в себя два уравнения движения наклонного квазиоднородного слоя с учетом силы Кориолиса, уравнения сохранения для инверсионных аномалий температуры и солености и линеаризованное уравнение состояния. В число принятых допущений входят: стационарность процесса, однородность инверсионных аномалий в плоскости, параллельной слою, и возможность пренебречь нелинейными эффектами, вызванными прохождением внутренних волн. Фоновые распределения температуры и солености принимаются линейными по вертикали и в направлении поперек фронта. Вертикальные эффективные коэффициенты обмена теплом, солью и импульсом в конвективном слое, где должен иметь место баланс между вертикальными турбулентными потоками и адвективным поступлением тепла и соли, принимаются постоянными и равными друг другу.

Получено аналитическое решение задачи. Результаты моделирования позволили оценить коэффициент вертикального турбулентного обмена в слое (порядка  $1 \text{ см}^2/\text{с}$ ). Вид инверсионных профилей температуры и солености и профиля скорости свидетельствует о наличии переноса тепла и соли поперек фронта. Для условий эксперимента получена оценка эффективного квазигоризонтального обмена теплом и солью (порядка  $10^4 \text{ см}^2/\text{с}$ ).

В третьем параграфе автором учтен возможный наклон слоев во вдольфронтальном направлении. Принципиально это привело к появлению дополнительных членов в уравнениях баланса для тепла и соли. Получены решения модифицированной задачи и уточнены формулы для оценок коэффициентов обмена, полученные в предыдущем параграфе.

В заключение главы делается вывод, что исследованное явление может быть ответственным за то, что в основной области ступенчатых структур горизонтальная изменчивость температуры и солености значительно снижается по сравнению с областями на их боковой периферии.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы:

1. Численным экспериментом подтверждена возможность генерации СТС главного термоклина путем трансформации интрузионной структуры солевыми пальцами.

2. Выявлены необходимые условия реализации этого механизма.

3. Решена модельная задача о распространении вширь области ступенчатого расслоения, учитывающая особенности процессов двойной диффузии.

4. Установлено, что скорость распространения не определяется конкретным видом функциональной зависимости скорости вовлечения от текущей толщины перемешанного слоя; результаты расчетов не противоречат данным натуральных наблюдений.

5. Экспериментальное исследование взаимодействия СТС с термохалинным фронтом позволило установить, что термохалинные инверсии в квазиоднородных слоях формируются в результате адвективных разнонаправленных движений, обусловленных отклонением слоев от горизонтали.

6. Предложена модель этого явления, причем результаты моделирования качественно согласуются с данными наблюдений.

7. По результатам проведенных расчетов и экспериментальным данным выполнены оценки коэффициентов вертикального турбулентного обмена в квазиоднородных слоях и эффективных коэффициентов квазигоризонтального обмена теплом и солью.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Журбас В. М., Кузьмина Н. П., Кульша О. Е. Ступенчатое расслоение океанского термоклина при трансформации термохалинных интрузий солевыми пальцами (численный эксперимент). - Океанология, 1987, т. 27, N 3, с. 377-383.

2. Журбас В. М., Кузьмина Н. П., Кульша О. Е. Численное моделирование ступенчатого расслоения главного термоклина океана при вырождении термохалинных интрузий солевыми пальцами. - В сб.: Океанологич. исследования, М., 1987, N 40, с. 74-81.

3. Кирющенко И. Г., Козлов А. Н., Кропинов В. А., Кульша О. Е., Новиков Г. Д., Охотников И. Н., Погребной А. Е. Исследования тонкой термохалинной структуры в северо-западной части Тропической Атлантики. - В сб.: Исследования вертикальной тонкой структуры гидрофизических полей в тропической и субтропической зонах Атлантики. 49-й рейс НИС "Михаил Ломоносов" МГИ АН УССР, 1989, деп. в ВИНТИ, N 378-В89.

4. Журбас В. М., Кузьмина Н. П., Кульша О. Е. Термохалинные инверсии в квазиоднородных слоях ступенчатой тонкой структуры океана. - Изв. АН СССР. ФАО, 1990, т. 26, N 11, с. 1191-1199.

5. Журбас В. М., Кузьмина Н. П., Кульша О. Е. Термохалинные инверсии в областях ступенчатого расслоения океана. - Тезисы докл. на 3-м Всесоюз. симпозиуме "Тонкая структура и синоптическая изменчивость морей и океанов", Таллин, 1990, с. 61.

49.79.8A  
Кульша Олег Евгеньевич

ВОКОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОЦЕССАХ СТУПЕНЧАТОГО  
РАССЛОЕНИЯ ОКЕАНА

А в т о р е ф е р а т

---

Подписано в печать 05.04.93 г.

Формат бумаги 60x90 1/16

Заказ 379

Объем 1 уч. изд. л.

Тираж 100 экз.

---

Отпечатано в ИПУ "ЭКОСИ - Гидрофизика"

335000, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

161.870

AB 27.247

**AB 27.247**