

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МОРЕСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ЧУХАРЕВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ ОБМЕН
В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ОКЕАНА

(04.00.22 - геофизика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь - 1993



00814077 (R)

физическом институте АН

Научный руководитель

доктор физико-математических наук
С.Г. Богуславский

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук,
профессор А.А. Березовский
(Институт математики АН Украины)

доктор физико-математических наук,
профессор В.А. Иванов (ИГи АН Украины)

Ведущая организация

Институт гидромеханики АН Украины,
г. Киев

Защита состоится "28" ^{ноября} декабря 1993 г. на заседании

Специализированного совета Д 016.01.01 при Морском гидрофизическом институте АН Украины (335000, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Морского гидрофизического института АН Украины (335000, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2).

Автореферат разослан "25" ноября 1993г.

Ученый секретарь

Специализированного совета

доктор физико-математических наук

ЛННБ
АН Украины

А.И. Суворов

Актуальность темы. В океане процессы турбулентного переноса массы, теплоты и вещества играют существенную роль в формировании гидрофизических и гидрохимических полей, распространении различных примесей. Увеличение промышленных и бытовых отходов приводит к увеличению выбросов загрязняющих веществ в прибрежные акватории. В связи с этим возникает важная проблема прогнозирования зон с повышенной концентрацией тех или иных веществ и времени их существования в различных гидро- и метеорологических условиях. Это возможно лишь на основе знания закономерностей турбулентности верхнего слоя океана, специфические черты которой обусловлены наличием свободной поверхности, через которую происходит взаимодействие с атмосферой.

В полуэмпирических теориях турбулентности, очень широко применяющихся в океанологических задачах, основными параметрами являются коэффициенты турбулентного обмена. Для установления зависимостей этих коэффициентов от определяющих факторов нужно знать главенствующие механизмы генерации турбулентности в том или ином случае. Основными механизмами генерации турбулентности в верхнем слое океана являются: гидродинамическая неустойчивость волновых движений, индуцируемых поверхностными волнами; сдвиг скорости чисто дрейфового течения, вызванный касательным напряжением ветра; обрушивание поверхностных волн и неустойчивость конвективных движений [Монин, 1970].

Несмотря на большое количество работ, посвященных моделированию верхнего слоя, пока нет единого мнения у исследователей о количественном вкладе каждого из перечисленных механизмов в турбулентацию океана. В отсутствие обреченный они отдадут предпочтение

нелинейности поверхностных волн [Китайгородский, 1960, 1961; Бенилов, 1979], другие - сдвигу скорости течения [Csanady, 1984].

Очень мало информации о турбулентности в слое ветрового волнения при наличии обрушивающихся волн. Хотя довольно много исследований были направлены на изучение турбулентной диффузии примесей в океане [Озмидов, 1986; Зац. и др., 1973], недостаточно подробно рассматривалась мелкомасштабная часть процесса в диапазоне от десятков сантиметров до десяти метров. В то же время сейчас признана важная роль мелкомасштабной турбулентности в формировании и изменении гидрофизических структур в океане.

Таким образом, вышеназванные проблемы остаются еще слабоизученными, что и определяет актуальность проведенных исследований.

Цель работы. Целью настоящей работы является выявление качественных и количественных связей характеристик мелкомасштабной турбулентности с определяющими параметрами, оценка ее влияния на вертикальный обмен в приповерхностном слое океана. С учетом этого были определены задачи работы:

- экспериментальное определение зависимостей коэффициентов турбулентной диффузии от основных турбулизирующих факторов;
- определение вкладов каждого из механизмов генерации турбулентности в формирование турбулентной структуры;
- расчет влияния различных типов обрушивающихся поверхностных волн на турбулентный режим;
- оценка влияния сезонной и суточной конвекции на вертикальный обмен, определение коэффициентов конвективного обмена и расчет глубины проникновения конвективных движений.

Научная новизна и практическая ценность.

В зависимости от количественного соотношения различных механизмов генерации турбулентности рассмотрены отдельно три состоя-

ния приповерхностного слоя, для которых предложены методы, позволяющие определять коэффициенты вертикального турбулентного обмена. Предложен оригинальный метод расчета коэффициентов турбулентной диффузии по кривым оптической плотности негативов, полученных подводной фотосъемкой флуоресцирующего красителя. При помощи этого метода получены эмпирические зависимости вертикальных коэффициентов турбулентной диффузии от параметров волнения. Экспериментально обнаружено явление небольшого превышения вертикальных коэффициентов над горизонтальными (около 20%) на начальной стадии распространения струи от точечного источника примеси, расположенного у поверхности моря при нейтральной стратификации приповерхностного слоя. Определены вклады в турбулентный режим (в отсутствие обрушений) двух механизмов генерации турбулентности — сдвига скорости дрейфового течения и нелинейности поверхностных волн.

Для расчета характеристик турбулентности, обусловленной обрушиванием ветровых волн, предложен метод, основанный на теории турбулентных струй. При различных типах обрушивающихся волн используются разные модели. Впервые получено решение задачи о распространении плоской аэрированной струи. Показана существенная роль обрушивающихся волн в увеличении коэффициентов турбулентного обмена и определена глубина непосредственного проникновения обрушившейся жидкости.

Экспериментально определены коэффициенты вертикального обмена при сезонной и суточной конвекции. Для зимней конвекции роликового типа рассчитана глубина проникновения конвективных струй с учетом лагузлойности океана и показано хорошее совпадение с натурными данными.

Результаты диссертации могут быть использованы для определения вертикальных потоков пассивной примеси (включая потоки тепла, соли и импульса), необходимых для расчетов и прогнозов изменений

термохалинной структуры верхнего слоя океана и распространения загрязняющих веществ. Предложенные методы исследования и полученные эмпирические формулы дают возможность вычислить коэффициенты вертикального турбулентного обмена при различных состояниях поверхности океана и в большом диапазоне изменений величин скорости ветра и высоты поверхностных волн.

Личный вклад автора в проведенное исследование.

Автор принимал непосредственное участие в планировании и проведении экспериментов, анализе и интерпретации полученных результатов. В совместных публикациях автором осуществлялось формулирование проблем, выводов, написание и редактирование текста. Постановка ряда задач, их решение и анализ проведены автором самостоятельно.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на Международной школе-симпозиуме "Динамические системы и турбулентность" (Арым, Кацивели, 1991 г.), на Болгарско-советском симпозиуме по диффузии и турбулентности (ИГА, 1989 г.), на Всесоюзной конференции "Совершенствование биопозитивных конструкций морских берегозащитных сооружений" (Севастополь, 1989 г.), на Всесоюзных научно-технических конференциях молодых исследователей (Севастополь, 1986 - 88 г.г., Киев, 1937 г.), на Бассейновой секции Атлантического и Индийского океанов (Севастополь, 1989 г.), на семинаре кафедры физики моря МГУ им. Ломоносова (Москва, 1990 г.), на Научно-технических советах ИО МГИ (Кацивели, 1985 - 1991 г.г.), на научных семинарах отдела турбулентности и отдела экспериментальной гидрофизики (Севастополь, Кацивели, 1984 - 1993 г.г.).

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 95 наименований и содержит 117 страниц текста, включающих 26 рисунков и 7 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показана его научная новизна и кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава посвящена экспериментальному исследованию мелкомасштабной турбулентной диффузии в слое ветрового волнения при небольших скоростях ветра и анстах зои и определению количественных вкладов основных механизмов генерации турбулентности для этого случая: неустойчивости вертикальных градиентов скорости орбитального движения частиц и сдвига скорости чисто дрейфового течения.

В первом параграфе описаны наиболее важные исследования турбулентности в приповерхностном слое океана, лежащие в основе формирования современных представлений о ее структуре и характерных особенностях. Сформулированы вопросы и проблемы, остающиеся малоизученными.

Во втором параграфе изложены методы расчета коэффициентов турбулентной диффузии. В качестве модели использовалось полуэмпирическое двумерное уравнение, коэффициенты считались постоянными в исследуемом диапазоне масштабов. Для определения вертикальных коэффициентов на различных глубинах предложен метод, основанный на подводной фотосъемке струи флуоресцирующего красителя и последующей обработке негатива на микрофотометре, что позволяло получать кривую распределения концентрации красителя в поперечном сечении диффундирующей струи. Знание же относительного изменения концентрации от оси струи к ее границе дает возможность определить коэффициент.

В третьем параграфе описаны натурные эксперименты, проводившиеся на стационарной океанографической платформе в п. Каптивели.

При помощи несложного оборудования имитировался стационарный точечный источник примеси, в качестве индикатора использовался флуоресцирующий краситель родамин 6Ж, который выпускался на различных глубинах. Фотографирование производилось на панхроматическую черно-белую фотопленку, обработка негативов велась на микрофотометре ИжО-451. Во время проведения экспериментов регистрировались скорость ветра, параметры волнения и скорость основного течения. Отмечены достоинства и недостатки использовавшейся методики, указаны возможные источники ошибок и оценены погрешности определяемых величин.

В четвертом параграфе проводится обсуждение полученных результатов и их интерпретация. При исследовании диффузии от точечного источника, расположенного на поверхности моря, в области малых масштабов — до 1 м — обнаружено небольшое (около 20%) превышение вертикальных коэффициентов над горизонтальными, что объяснено существованием больших вертикальных градиентов скорости в развитом двумерном волнении. Получены эмпирические зависимости коэффициентов вертикального турбулентного обмена от параметров волнения вида

$$K = A \frac{h^2}{T} + B$$

где h и T — высота и период волнения, A и B — числовые константы, установленные для горизонтов 0,5, 2 и 3,5 м. Определены диапазон применимости этих зависимостей ($300 \text{ см}^2/\text{с} \leq \frac{h^2}{T} \leq 2200 \text{ см}^2/\text{с}$), коэффициенты корреляции и построены 90%-е интервалы доверительности. Для выявления вкладов в турбулизацию исследуемого слоя поверхностных волн и сдвига скорости дрейфового течения были рассчитаны величины скорости диссипации турбулентной энергии, которые сравнивались с теоретическими, полученными в предположении существования только какого-либо одного механизма

генерации. Анализ результатов показал, что при небольших высотах волн (до 0,5 м) и скоростях ветра до 5 м/с необходим учет обоих механизмов, причем вклад сдвига скорости может быть определяющим, а при $h > 0,5$ м влияние поверхностных волн в исследуемом слое становится доминирующим.

Во второй главе диссертации исследуется влияние обрушивающихся волн на турбулентный режим. В данной работе предлагается использовать для изучения этого явления методы теории турбулентных струй.

В первом параграфе подробно описан механизм обрушивания поверхностных волн, приведены имеющиеся в литературе данные натуральных и лабораторных экспериментов по изучению процесса обрушивания волн, а также некоторые оценки их влияния на турбулентность. Отмечено, что на глубокой воде обрушивающиеся волны делят на два типа — "ныряющие буруны" и "скользящие буруны". Для обоих типов волн предлагается использовать теорию свободных турбулентных струй, основные положения которой тоже приведены в этом параграфе.

Во втором параграфе рассматриваются обрушивающиеся волны ныряющего типа и их проникновение под поверхность воды. Так как глубина проникновения струи в жидкость очень сильно зависит от того, разбита струя или нет, на основе теории Рэлея об устойчивости жидкого цилиндра в воздухе оценивается высота волны, когда струя еще остается непрерывной. Для реальных волн в океане это условие выполняется. Далее струя рассматривается как затопленная вертикальная, и с помощью интегрального метода находятся законы изменения осевой скорости, энергии и коэффициента турбулентного обмена с глубиной:

$$\frac{v_m}{v_0} \sim Z^{-\frac{1}{2}}, \quad \frac{E}{E_0} \sim Z^{-\frac{1}{2}}, \quad \frac{K}{K_0} \sim Z^{\frac{1}{2}}.$$

Отдельно рассмотрено проникновение струи в сносящий поток. В этом случае на основании экспериментальных и теоретических данных различных авторов определяется глубина непосредственного проникновения обрушившейся жидкости: $h_1/d_0 \leq 4$, где d_0 - начальный диаметр струи. Для оценки вклада обрушивающихся волн в увеличение среднего коэффициента турбулентного обмена использована эмпирическая зависимость из работы [Monahan, 1971], связывающая площадь поверхности моря, занятой обрушивающимися волнами, со скоростью ветра. Показана их существенная роль в турбулизации приповерхностного слоя.

В третьем параграфе произведены расчеты характеристик турбулентности под скользящими бурунами. В этом случае обрушивающаяся часть волны образует квазистационарный "барашек", который движется вместе с волной и представляет собой водно-воздушную смесь примерно постоянной плотности [Longuet-Higgins, Turner, 1974]. Для расчета влияния этого процесса на турбулизацию движение смеси под поверхностью воды интерпретируется как движение двухфазной струи в среде с постоянным давлением. В качестве исходных берутся уравнения неразрывности и движения для двухфазной среды: [Федоровский и др., 1988]. Как и в случае с затопленной струей используется интегральный метод расчета. Этот метод позволяет, наряду с простотой решения, достичь хорошей согласованности результатов расчета и эксперимента подбором только одного эмпирического коэффициента. Получено численное решение для распределения объемной концентрации пузырьков и вертикальной составляющей скорости по глубине. Сравнение расчетов с экспериментальными данными о рас-

пределении пузырьков из работы [Колобаев, 1975] позволяет определить эмпирический коэффициент $\chi \approx 0,1$. Убывание скорости и энергии аэрированной струи с глубиной имеет вид

$$\frac{v_m}{v_0} \sim z^{-0,6}; \quad \frac{E}{E_0} \sim z^{-0,8}$$

т.е. происходит быстрее, чем в затопленной струе, как и следовало ожидать, в то же время коэффициент турбулентного обмена в зоне обрушений, рассчитываемый по формуле Прандтля $K = \chi v_m b$, где b - полуширина струи, может быть больше, так как в затопленной струе $\chi \approx 0,01$. Это не противоречит данным о том, что в двухфазной среде коэффициенты турбулентности выше, чем в однофазной [Эплгейн, 1963] .

Сравнение рассчитанных значений скорости в струе и коэффициентов турбулентного обмена с имеющимися в литературе экспериментальными данными показало неплохое соответствие.

Третья глава диссертации посвящена исследованию вертикального обмена при наличии сезонной и суточной конвекции.

В первом параграфе описан механизм конвекции и ее основные виды, существенно отличающиеся по интенсивности: сезонная и суточная. Охарактеризована роль конвекции в формировании термохалинной структуры верхнего слоя океана и вертикальном переносе примесей. Отмечены важные результаты исследования конвекции [Зубов, 1947; Булгаков, 1975] и другие, а также вопросы, рассматриваемые в настоящей главе: количественная оценка вклада конвекции в вертикальный обмен в приповерхностном слое и влияние конвективных движений на его турбулизацию.

Во втором параграфе описаны эксперименты по исследованию зимней конвекции в прибрежной зоне Черного моря. Зондированием определялся градиент температуры от поверхности до дна (30 м), по сос-

тавляющим теплового баланса рассчитывался поток тепла с поверхности, что позволяло вычислять коэффициенты конвективного обмена. Адвективными составляющими и градиентами солености пренебрегалось на основании проведенных оценок. Градиенты температуры при интенсивном выхолаживании ($Q \approx 0,9$ кал/см²·с) были в среднем около $1,5 \cdot 10^{-2}$ °С/м. Рассчитанные коэффициенты температуропроводности находились в пределах $26 - 33$ см²/с. Величины этих коэффициентов свидетельствуют о том, что в описанных условиях вертикальный обмен происходит главным образом за счет конвекции.

Измеренные профили температуры сравнивались с теоретическим распределением при свободной температурной конвекции [Монин, Яглом, 1965]:

$$\bar{T}(z) = \bar{T}_\infty + C_1 (Q/c_p \rho)^{2/3} (\beta g z)^{-1/3}$$

где T_∞ - температура вдали от поверхности $z = 0$, через которую проходит поток тепла Q , C_1 - эмпирическая константа, c_p - удельная теплоемкость, ρ - плотность, β - коэффициент теплового расширения, g - ускорение свободного падения. Это дало возможность определить эмпирическую константу $C_1 \approx 0,92$ по нашим экспериментам.

Определенные выше величины позволяют применить для расчета глубины проникновения конвекции теорию турбулентных струй. При так называемой конвекции роликового типа (видимое проявление которой - длинные горизонтальные полосы на поверхности [Монин, Красицкий, 1985]) движение воды представляется как система чередующихся струй, направленных вертикально вниз и вверх. В модели сделан ряд упрощений, облегчающих решение задачи: предполагается стационарность процесса, зависимость плотности только от температуры, не учитываются адвективные и волновые движения, сила Кори-

олиса и диссипация. Океан считается двухслойным: в верхнем слое стратификация слабонеустойчивая, в нижнем (термоклине) – сильная устойчивая. Движение воды вниз происходит не до глубины, где плотность охлажденной воды равна плотности окружающей, а дальше, пока скорость не погасится силой Архимеда.

Для расчета скорости и температуры в нисходящих потоках использовался интегральный метод расчета плавучих турбулентных струй в стратифицированной среде [Бруяцкий, 1986]. Этот метод позволяет определять глубину проникновения конвективных движений в зависимости от величины теплотдачи с поверхности. Сопоставление рассчитанных значений заглубления термоклина по месяцам в осенне-зимний период показало хорошее качественное совпадение с натурными данными для Черного моря.

В третьем параграфе исследуется влияние суточной конвекции на вертикальный обмен в приповерхностном слое. Для определения коэффициентов турбулентного обмена использовалась двумерная модель ночной конвекции [Foster, 1971]. Экспериментальные кривые распределения температуры по глубине и их изменение в течение суток сравнивались с соответствующими рассчитанными кривыми, коэффициент определялся из условия наилучшего совпадения. Эксперименты проводились в июне-июле, когда наблюдается интенсивный дневной прогрев и ночное выхолаживание.

Для сравнения были рассчитаны коэффициенты по методу Фурье-Шмидта [Штокман, 1946] и по эмпирической зависимости, полученной автором в первой главе. Коэффициенты, определенные по формулам Штокмана и по эмпирической зависимости дают хорошее совпадение, немного худшее – с определенными по модели Фостера, что объясняется ее скорее качественным характером. Значения коэффициентов конвективного турбулентного обмена и рассчитанные величины скорости

диссипации энергии конвективных движений свидетельствуют о довольно незначительном влиянии суточной конвекции на турбулентный режим приповерхностного слоя.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы, которые сводятся к следующему.

1. В зависимости от количественного соотношения различных механизмов генерации турбулентности в настоящей работе рассмотрены три состояния приповерхностного слоя, для которых разными способами определяются коэффициенты вертикального турбулентного обмена.

2. Предложен оригинальный метод определения коэффициентов турбулентной диффузии по кривым оптической плотности негативов, полученных подводной фотосъемкой флуоресцирующего красителя.

3. В области малых масштабов обнаружено экспериментально небольшое превышение (около 30%) вертикальных коэффициентов над горизонтальными и дано физическое обоснование этому явлению.

4. На основании большого количества экспериментов получены эмпирические зависимости коэффициентов вертикального обмена от параметров волнения и определены доверительные интервалы и диапазоны применимости этих зависимостей.

5. Для расчета характеристик турбулентности под обруливающимися поверхностными волнами предложен метод, основанный на теории турбулентных струй. При обруливании волн типа "ныряющих бурюнов" применена модель затопленной струи, определена глубина непосредственного проникновения обрулившейся жидкости $h_1/d_0 \leq 4$ и сделан вывод о принципиальной возможности использования аналогии турбулентности у твердой стенки под свободной поверхностью ниже этого уровня.

6. Для волн типа "скользящих бурюнов" впервые решена задача

О распространении плоской аэрированной струи и получены формулы для расчета скорости, энергии и коэффициентов турбулентного обмена. Показана существенная роль обруливающих волн в увеличении турбулентного обмена.

7. При зимней конвекции во время интенсивного выхолаживания определены экспериментально коэффициенты конвективного обмена. Их величины свидетельствуют о доминировании этого механизма в вертикальном перемешивании в описанных условиях.

8. Для конвекции роликового типа применена модель вертикальной струи в стратифицированной среде. На основании этой модели численно решена задача определения глубины проникновения конвективных движений по месяцам в осенне-зимний период, получено хорошее качественное совпадение с натурными данными.

9. При суточной конвекции проведен сравнительный анализ коэффициентов, определенных разными способами, сделан вывод о необходимости учета суточной конвекции как механизма генерации турбулентности лишь при малых скоростях ветра и высотах волн.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах. -

1. Чухарев А.М., Ковалев Е.Н. Оценка коэффициентов мелкомасштабной турбулентной диффузии в поверхностном слое моря// Деп. в ВИНТИ, № 1288 - 35.
2. Чухарев А.М., Ковалев Е.Н. Исследование конвективного перемешивания в процессе зимнего выхолаживания вод//Современные проблемы океанологии Черного моря. Севастополь: 1986. - Деп. в ВИНТИ, № 1579 - 336. С. 184 - 190.
3. Чухарев А.М., Ковалев Е.Н. Изменчивость коэффициентов турбулентной диффузии в слое ветрового волнения//Гидрофизические исследования Атлантического океана и Черного моря. Мор.

гидрофиз. ин-т АН УССР. С. 2600 - 287. С. 103 - 111

Ав 28.892

4. Чухарев А.М., Котовщиков
переноса примесей в приповерхностном слое // Мор. гидрофиз. журнал, 1991. С. 97 - 104. Деп. в ЗИНТИ, № 181 - 391.
5. Чухарев А.М. Экспериментальное определение коэффициентов мелкомасштабной турбулентности в слое волнового перемешивания // Мор. гидрофиз. журнал, 1992. № 6. С 54 - 61.

Александр Михайлович Чухарев

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ ОБМЕН
В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ОКЕАНА

А в т о р е ф е р а т

Подписано в печать 26.10.93 г.

Формат бумаги 60 x 90 1/6

Заказ 462

Объем I уч. изд. л.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИШУ "ЭКОСИ - Гидрофизика"

335000, г. Севастополь, ул. Ленина, 28