

ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертацию Чухарева Александра Михайловича
**«Вклад основных механизмов генерации турбулентности в вертикальный обмен в
деятельном слое моря»,**
представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика

Адекватная параметризация турбулентного обмена является одной из важнейших задач в современной океанологии. Перераспределение энергии, тепла и других субстанций зависит от интенсивности вертикального перемешивания, в котором существенная роль принадлежит турбулентности. Поэтому тема диссертации, безусловно, актуальна.

Следует обратить внимание на общую характеристику темы исследования, определенную диссертантом: “Существенные различия фоновых условий в разных слоях океана обуславливают и важные отличия турбулентных режимов. Очень непростым для исследования и моделирования является самый верхний слой, который подвержен внешним атмосферным воздействиям в широком диапазоне масштабов и характеризуется большой изменчивостью. Поверхностные и внутренние волны, их обрушения, сдвиг скорости течения, тепло- и влагообмен с атмосферой, прямая передача импульса и энергии из атмосферы, солнечная радиация – вот далеко не полный перечень факторов, определяющих характеристики турбулентности в верхнем слое океана.”

Работа во многом следует формату традиционных исследований турбулентности в океане: выполнены экспериментальные наблюдения, разработаны модели, проведена проверка моделей на адекватное соответствие расчетов натурным данным.

Известно, что очень часто в океанологии инструментальные измерения являются толчком к новым теоретическим изысканиям и служат основой последующего развития наших физических представлений. Поэтому в первом разделе диссертации представлено описание нового прибора, особенностям измерений в разных слоях и строгому подходу к обработке данных. При этом специфика разных слоев моря – приповерхностного и более глубокого стратифицированного – предполагает применение разных подходов к измерению турбулентных характеристик. Созданный новый измерительный комплекс «Сигма-1» имеет две модификации, которые используются для разных задач. Комплекс регистрирует средние и пульсационные величины, снабжен системой контроля положения и соответствует современным требованиям по набору измеряемых параметров, быстродействию и точности.

Для исследования турбулентности в слоях глубиной 10 – 100 м с борта НИС применялся зондирующий вариант комплекса, позволяющий получать профили измеряемых величин в режиме свободного падения со скоростью около 0,7 м/с. Измерения вблизи поверхности моря на глубинах 0 – 20 м проводился с неподвижного основания (платформы) позиционным прибором, который фиксировался на выбранном горизонте с помощью оригинальной системы подвеса [Пат. 102129, 2013]. Здесь же автором были разработаны алгоритмы и созданы программы коррекции измеренных компонент пульсаций скорости для устранения помех от собственных колебаний прибора.

Далее, с целью оперативной обработки данных измерений автором создан пакет программ, объединенных графическим пользовательским интерфейсом. Пакет включает в себя модули и подпрограммы, позволяющие работать с разными типами файлов, объединять их, конвертировать, строить различные графики, диаграммы, осуществлять всевозможные математические процедуры с массивами данных, фильтрацию, а также производить статистический, спектральный и вейвлет-анализ, сохранять данные и результаты обработки в нужном формате.

Таким образом, представленная в диссертации разработанная автором со своим коллективом измерительная система характеристик турбулентности вблизи поверхности моря – это новое решение, которое позволяет проводить измерения и получать сведения о турбулентности в слое, где очень трудно использовать разработанные ранее приборы.

Во втором разделе автором представлены модельные разработки турбулентного обмена для приповерхностного слоя моря, позволяющие рассчитывать интенсивность при различных гидрометеорологических условиях. В силу сложного характера структуры и динамики мелкомасштабной турбулентности вблизи поверхности моря, модельные представления для этого слоя обычно стараются свести к рассмотрению одного или двух основных источников турбулентности. Соискателем предложены разные модели, которые можно использовать и при умеренных скоростях ветра, и в штормовую погоду.

В начале второго раздела изложены основные подходы к моделированию турбулентных течений с применением $k-\epsilon$ моделей, в которых используются уравнения баланса кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации турбулентной энергии. Замыкание в таких моделях производится на уровне вторых моментов, что позволяет учитывать локальные свойства турбулентных течений. В качестве основных источников турбулентности здесь рассматриваются сдвиг скорости дрейфового течения, поверхностные волны и их обрушение. Для приповерхностного слоя наиболее

употребительной является модель, в которой скорость диссипации и кинетическая энергия турбулентности выражаются через масштаб скорости и масштаб турбулентности l .

Далее автором рассматривается разработанная им модель, учитывающая уже три основных механизма генерации турбулентности в приповерхностном слое, включая обрушение волн, а также концепция разномасштабности этих механизмов.

Следует отметить, в равновесных моделях турбулентности предполагается, что вся энергия, поступающая к турбулентности в области крупных масштабов, передается с одинаковой скоростью по спектру к меньшим масштабам и в конечном итоге диссипирует. При этом рассматривается только один временной масштаб, что является сильным упрощением. И здесь автор предлагает многомасштабный механизм генерации турбулентных течений, а энергетический спектр предлагается разделить на 4 участка, в которых последовательно происходит генерация турбулентности разными механизмами и ее инерционный перенос в область более высоких волновых чисел и затем диссипация.

В конце второго раздела проводится сопоставление различных моделей для приповерхностного слоя с экспериментальными данными, полученными в течение ряда лет в натурных экспериментах на океанографической платформе МГИ в п. Кацивели. При этом важно отметить, что автором приводятся и ситуации, когда ни одна из рассмотренных моделей не описывает должным образом интенсивность турбулентности под поверхностью моря. Это объясняется существованием других механизмов генерации турбулентности, которые пока не учитываются в моделях, и в этих случаях необходимо продолжение подобных исследований.

Третий раздел диссертации посвящен исследованию нестационарных турбулентных процессов вблизи поверхности моря. Известно, что на турбулентный режим течений существенное влияние оказывают когерентные структуры. И в третьем разделе автором анализируются обширные экспериментальные наблюдения, на основании которых делается предположение, что в исследовавшемся прибрежном районе такие структуры играют заметную роль. Здесь для анализа натурных измерений, кроме обычных корреляционных и спектральных оценок, применялся вейвлет-анализ. Этот метод позволяет выявлять распределение энергии измеряемых величин по масштабам и проследивать ее эволюцию, причем одинаково хорошо выделяет как низкочастотные, так и высокочастотные характеристики сигнала на разных временных масштабах. При этом важно отметить, что в этих экспериментах анализируются процессы, происходящие одновременно в пограничных слоях моря и атмосферы – именно такой подход сейчас считается наиболее перспективным, поскольку взаимодействие двух сред необходимо исследовать комплексно. Применение автором вейвлет-анализа представляется полезным,

это позволило ему получить важные результаты: установить корреляцию в интенсивности процессов в атмосфере и море, определить фазовые сдвиги при взаимодействии когерентных структур на субмезомасштабах.

На основании сравнительного анализа когерентных структур в приводном слое атмосферы и в приповерхностном слое моря сделан вывод, что предложенная нестационарная модель в целом правильно описывает турбулентный режим под поверхностью моря и соответствует экспериментальным данным.

Применение зондирующего комплекса «Сигма-1» для исследования тонкой структуры и микроструктуры в стратифицированных слоях Черного моря представлено в четвертом разделе диссертации. Измерения проводились в зоне сопряжения шельфа и континентального склона в области резкого перепада глубин. Следует сказать, что, к сожалению, детальных исследований этих районов на предмет влияния берега и топографии дна на интенсивность вертикального перемешивания сравнительно мало. Поэтому подобные измерения, проведенные в северо-западной части моря, очень важны. Для расчета интенсивности вертикальной турбулентной диффузии использовался метод, разработанный А.С. Самодуровым и успешно применявшийся для других районов Черного моря. Проведенная оценка масштабов турбулентных пятен в исследованных районах свидетельствует о значительном (почти на порядок) увеличении коэффициента турбулентной диффузии в этой зоне по сравнению с открытой частью моря при аналогичных параметрах стратификации. Такой достаточно неожиданный результат объясняется влиянием резкого перепада глубин, приводящего к повышению плотности энергии внутренних волн и большей вероятностью их обрушений.

В конечном итоге новизна в диссертации представлена в следующих результатах

1. Разработана и внедрена в экспедиционную практику оригинальная измерительная система для исследования характеристик турбулентности в приповерхностном слое моря с применением приборов высокого разрешения.
2. Создана новая численная модель для описания параметров вертикального турбулентного обмена вблизи поверхности моря при умеренных скоростях ветра, рассматривающая в качестве источников турбулентности сдвиг скорости течения и поверхностные волны.
3. Впервые для приповерхностного слоя моря разработана многомасштабная физико-математическая модель вертикального турбулентного обмена, которая учитывает три механизма генерации турбулентности (сдвиг дрейфовых течений, поверхностные волны и их обрушение) и применима в широком диапазоне внешних условий, включая штормовые.

4. В турбулентных зонах вблизи поверхности моря выявлены субмезомасштабные периодичности, характерные для когерентных структур.
5. Разработана новая нестационарная модель турбулентного обмена для приповерхностного слоя.
6. На основе экспериментальных исследований в различных районах Черного моря впервые установлено, что интенсивность турбулентного обмена в верхнем стратифицированном слое в зоне сопряжения шельфа и континентального склона почти на порядок выше, чем в открытых частях моря при аналогичных условиях стратификации.

Вместе с тем к работе имеется ряд замечаний.

1. По первому разделу. В тексте диссертации говорится о программном обеспечении измерительного комплекса и пакете для статистической обработки и анализа. В то же время сами программы в работе никак не представлены, поэтому оценивать эту часть работы затруднительно. Метод Стюарта и Гранта для расчета скорости диссипации турбулентной энергии, использованный автором, известен давно, хотя многие авторы используют другие способы, в частности, расчет по инерционному участку спектра с привлечением гипотезы Колмогорова или по ко-спектрам на частотах ниже частоты поверхностных волн. Сравнения с этими методами не проведено.

2. По второму разделу. Численная модель, предложенная автором для описания турбулентного обмена при умеренных скоростях ветра, сопоставляется с малым количеством полученных ранее экспериментов. Проверка ее на данных, полученных с помощью нового измерительного комплекса, почему-то не проводилась. Думается, что это могло бы дать более ясное представление о достоинствах и недостатках данной модели. Верификация многомасштабной модели и моделей других авторов, проведенная в четвертом параграфе второго раздела, к сожалению, не дает четкого ответа на вопрос о наиболее приемлемой модели для слабых и умеренных ветров.

3. В четвертом разделе при описании экспериментов не везде представлена статистическая достоверность результатов. В частности, доверительные интервалы обозначены лишь на отдельных графиках, не указано число степеней свободы в расчетах спектров при обработке результатов зондирований.

Высказанные замечания не снижают общего хорошего впечатления от диссертации. Автором проделана большая качественная работа, уровень исследований достаточно высокий и соответствует уровню докторской диссертации.

В диссертации решена важная научная проблема – на основе большого числа экспериментальных данных и теоретического моделирования получены и уточнены

физические представления о механизмах генерации турбулентности в деятельном слое моря и их вкладах в турбулентный обмен, а также получены практически значимые результаты, позволяющие оценивать интенсивность вертикального обмена и в перемешанном и в стратифицированном слоях.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и дает полное представление о сути работы и основных результатах.

Материалы диссертации в достаточной мере опубликованы автором и отражают его личный вклад, по теме диссертации опубликовано 30 работ. Среди них: 14 статей в отечественных и международных периодических научных изданиях, 2 патента, 8 статей в отечественных и международных сборниках научных трудов, 6 тезисов докладов. Результаты работ были неоднократно доложены на международных конференциях и симпозиумах.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 04.00.22 – геофизика

Таким образом, считаю, что рассматриваемая работа Чухарева А.М. соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 04.00.22 – «геофизика».

Главный научный сотрудник
Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН,
доктор физико-математических наук

Н. Н. Корчагин

Н.Н.Корчагин



Верно:

Заместителем директора ИО РАН *Умбелова В.В.*

д.д. 14.14

[Signature]