

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

УДК 551.465

Чухарев Александр Михайлович

ВКЛАД ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
В ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ОБМЕН В ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ МОРЯ

04.00.22 – геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Севастополь

2014

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте НАН Украины

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Показеев Константин Васильевич,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
заведующий кафедрой

доктор физико-математических наук
Корчагин Николай Николаевич,
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
главный научный сотрудник

доктор физико-математических наук
Чхетиани Отто Гурамович,
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
заведующий лабораторией

Защита состоится «30» декабря 2014 г. в 11⁰⁰ ч. на заседании специализированного
ученого совета Д50.158.02 при Морском гидрофизическом институте НАН Украины
по адресу: 299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Морского гидрофизического
института НАН Украины адресу: 299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2.

Автореферат разослан «_____» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
Специализированного ученого совета Д50.158.02
кандидат физико-математических наук

Кубряков А. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Океанская турбулентность играет важнейшую роль в вертикальном обмене и переносе свойств и вещества. Большинство процессов в океане – физических, химических и биологических – тем или иным образом связаны с турбулентными движениями, поэтому возрастающее внимание, уделяемое исследованию турбулентности, диктуется научными и практическими задачами геофизики. Турбулентность, в свою очередь, зависит от физических условий и движений разных масштабов, поэтому изучение всевозможных ее проявлений и закономерностей тесно связано с исследованием других процессов, определяющих ее интенсивность и эволюцию.

Первые целенаправленные экспериментальные исследования турбулентности в океане были проведены во второй половине XX столетия, и сейчас уже накоплены обширные знания о закономерностях турбулентного обмена. 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.

Выдающимся ученым в этой области А.С. Мониным были выделены основные механизмы генерации океанской турбулентности [Монин, Озмидов, 1981]. Для квазиоднородного слоя наиболее важными считаются гидродинамическая неустойчивость дрейфового течения, поверхностные волны и их опрокидывание, в стратифицированном слое к таковым относятся сдвиговые эффекты и обрушения внутренних волн.

В последние десятилетия проведены многочисленные исследования процессов, касающихся турбулентного обмена в верхнем слое океана, опубликовано большое количество работ, посвященных экспериментальным и теоретическим проблемам, выявлены важные законы и построены модели, описывающие различные турбулентные режимы. Но в силу уникальной сложности явления турбулентности как такового, а также разнообразия условий, в которых происходит турбулентный обмен, остается много нерешенных задач, актуальных, как в фундаментальном, так и в прикладном аспектах. Возможности современных инструментальных наблюдений, развитие теории турбулентности и вычислительных мощностей позволяют существенно продвинуться в изучении механизмов вертикального обмена.

Актуальность. Верхний слой океана имеет первостепенное значение в формировании климата и погоды на нашей планете, он также в наибольшей степени подвержен антропогенным и техногенным нагрузкам. Отсюда ясна необходимость

детального изучения закономерностей перемешивания внутри этого слоя, исследования влияния атмосферы и различных явлений вблизи водно-воздушной границы на формирование турбулентного режима. Без точного количественного учета физических механизмов взаимодействия атмосферы и океана невозможно создание теоретических моделей, адекватно описывающих потоки вещества и энергии между двумя средами и характер турбулентности во взаимодействующих слоях. Лишь относительно недавно стало очевидным, что исследования на малых масштабах, в которых изучается обмен теплом, импульсом и веществом через поверхность раздела, крайне важны для решения крупномасштабных задач изменений глобального климата и океанской циркуляции, в которых обычно оперируют сильно осредненными значениями метеорологических и гидрофизических полей.

Создание моделей, описывающих вертикальный обмен в океане, чрезвычайно важно в связи с возрастающей потребностью в точных прогнозах климатических и погодных условий, особенно их экстремальных проявлений, в оперативных оценках скорости и масштабов распространения различных примесей в океане, в том числе загрязняющих веществ. Все вышесказанное и определяет актуальность исследований, представленных в диссертационной работе.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Результаты, ставшие основой диссертационной работы, были получены в рамках различных международных и отечественных научных проектов и программ.

Программы Морского гидрофизического института:

- Комплексные исследования взаимодействия гидросферы, литосферы и атмосферы в зоне сопряжения суша – море Азово-Черноморского бассейна (шифр «Геоэкология»), № 0196U017319, 1996 – 2000 г.г., исполнитель.
- Разработка концептуальных основ геоэкологии сопряжения суши и моря в акватории Черного и Азовского морей (шифр «ГеоЭко»), 2001 – 2002 г.г., исполнитель.
- Междисциплинарные исследования фундаментальных процессов формирования и эволюции экосистемы глубоководной части Черного моря в условиях интенсивной антропогенной нагрузки, региональных вариаций и глобальных изменений климата (шифр «Экосистема»), №0101U001020, 2001 г., исполнитель.
- Исследование изменений климата в системе океан-атмосфера-литосфера на глобальных и региональных масштабах (шифр «Океан-климат»), №0101U001023, 2002 г., исполнитель.
- Разработка опытной системы контроля и прогноза ветро-волновых полей для районов нефтегазодобычи в северо-западной части Черного моря (шифр «Океан-нефть»), 2003 – 2004 г.г., исполнитель.

- Исследование закономерностей функционирования шельфовых экосистем в условиях антропогенной и техногенной нагрузки (шифр «Шельф»), 2001 – 2005 гг., ГР № 0101U001019, исполнитель.
- Современное состояние шельфовой зоны и рекомендации по использованию минеральных ресурсов шельфа (шифр «Ресурсы шельфа»), 2002 – 2006 гг., ГР № 0102U001482, исполнитель.
- Междисциплинарные фундаментальные исследования прибрежных и шельфовых зон Азово-Черноморского бассейна (шифр «Экошельф»), 2006 – 2010 гг., ГР № 0106U001409, исполнитель.
- Комплексные гидрофизические и гидрохимические исследования морской среды с целью устойчивого экологически и техногенно безопасного использования его ресурсного потенциала (шифр «Океанография»), 2008 – 2010 г.г., исполнитель.
- Фундаментальное исследование физических процессов, определяющих состояние морской среды (шифр «Физика моря»), 2009–2010 гг., ГР № 0109U003178, исполнитель.
- Комплексный мониторинг морских природных систем с целью устойчивого экологически и техногенно безопасного использования его ресурсного потенциала (шифр «Экспедиционные исследования»), 2010 – 2012 г.г., исполнитель.
- Разработка автоматизированных систем экологического контроля водных сред (шифр «Экогидроконтроль»), 2010 г., исполнитель.
- Риски катастроф в прибрежной зоне Азовского и Черного морей: мониторинг и их предупреждение (шифр «Риски»), 2013 г., исполнитель.
- Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий (шифр «Фундаментальная океанология»), 2011 – 2015 г.г., ГР № 0111U001420, исполнитель.

Международные проекты:

1. Научно исследовательский проект РАН «Клевант», Феодосия-2002. 2002 г.
2. Global Environment Facility: Black Sea Ecosystem Recovery Project (GEF/BSERP-2004). 2004 г., исполнитель
3. Научно-исследовательская программа Института океанологии РАН и Южного отделения ИО РАН «Черное море – 2004». 2004 г., исполнитель
4. «Numerical studies of physical exchange and biogeochemical transformations in the oxic/anoxic Cariaco basin» («Численные исследования физического обмена и биогеохимических преобразований в кислородно/бескислородном бассейне Кариако», CRDF_UKG2-2924-SE-07 (U.S. Civilian Research & Development Foundation), 2008–2010 г.г., исполнитель.

5. Комплексные международные экспедиции в рамках научно-технического сотрудничества с Институтом физики атмосферы, Институтом океанологии и Институтом космических исследований РАН 2007, 2009, 2012 г.г.

Цель и задачи исследования. Основная цель диссертационной работы – установление закономерностей вертикального турбулентного обмена в деятельном слое моря на основе экспериментальных и теоретических исследований, создание адекватных моделей для практических оценок потоков тепла, импульса и растворенных веществ.

При этом были поставлены и решены следующие задачи:

- создание измерительной системы для исследования мелкомасштабных турбулентных процессов в приповерхностном слое моря;
- проведение экспериментальных исследований в верхнем слое моря для системного накопления информации о микроструктуре гидрофизических полей в различных фоновых условиях;
- создание и верификация моделей турбулентного обмена для приповерхностного слоя моря с привлечением обширного массива экспериментальных данных;
- выявление характерных особенностей турбулентного обмена при взаимодействии с приводным слоем атмосферы в нестационарном режиме по данным экспериментальных наблюдений;
- разработка модели нестационарного турбулентного обмена для приповерхностного слоя моря и сопоставление с натурными данными;
- экспериментальная проверка в зоне сопряжения шельфа и континентального склона Черного моря предложенной ранее полуэмпирической зависимости коэффициента вертикальной турбулентной диффузии от параметров стратификации;
- моделирование мелкомасштабной структуры и локализованных турбулентных пятен в поле внутренних волн в стратифицированном слое.

Объектом исследования являются физические процессы и явления в верхних слоях моря, влияющие на вертикальный обмен. В качестве **предмета исследования** рассмотрены различные механизмы генерации турбулентности и их роль в формировании турбулентного режима: нелинейные эффекты поверхностных и внутренних волн, сдвиг скорости дрейфового течения, обрушение волн.

Для достижения поставленных целей применялись следующие **методы исследования**: проведение натурных экспериментов, систематический сбор данных, статистический, спектральный и вейвлет-анализ полученной информации, детальный анализ отдельных событий, создание адекватных теоретических и численных моделей и их верификация, сопоставление полученных данных с известными теориями и экспериментами.

Научная новизна полученных результатов. В диссертационной работе впервые получены следующие научные результаты:

1. Разработана и внедрена в экспедиционную практику оригинальная измерительная система для исследования турбулентности в приповерхностном слое моря с применением приборов высокого разрешения.

2. Создана новая численная модель для описания 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 и применима в широком диапазоне внешних условий, включая штормовые.

4. В турбулентных процессах вблизи поверхности моря выявлены субмезомасштабные периодичности, в которых присутствуют закономерности, 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.

Практическое значение полученных результатов. Полученные соотношения для расчета коэффициентов турбулентного обмена и скорости диссипации турбулентной энергии основаны на многочисленных натурных данных, имеют хорошую статистическую обеспеченность и могут быть использованы в практических оценках интенсивности вертикального турбулентного обмена в верхних слоях моря, потоков тепла, импульса, различных примесей и растворенных веществ. Результаты работы могут быть рекомендованы для применения в теоретических и прогностических моделях верхнего слоя моря и в объединенных моделях пограничных слоев моря и атмосферы.

Разработанные модели, описывающие изменчивость интенсивности турбулентного обмена в зависимости от гидрометеорологических условий, могут использоваться для расчета подсеточных параметров в крупномасштабных задачах динамики моря и атмосферы. Модели и методы применимы для оценок потоков тепла, соли и других субстанций, при оценке качества вод. Результаты важны для понимания физических механизмов взаимодействия моря и атмосферы и их влияния на структуру пограничных слоев обеих сред.

Массивы накопленной информации о физических характеристиках приповерхностного слоя моря уникальны по объему и набору измеряемых

параметров. Данные могут использоваться для дальнейшего анализа, выявления эмпирических закономерностей и верификации теоретических моделей. Экспериментальные данные получены при исследованиях в Черном море, но результаты и выводы, основанные на них, имеют достаточно общий характер, поскольку изучавшиеся основные физические механизмы, влияющие на турбулентный обмен, существуют в большинстве естественных водоемов.

Личный вклад соискателя. При выполнении диссертационной работы автору принадлежат:

- общая постановка проблемы;
- создание физических и численных моделей для приповерхностного слоя моря и моделирование локализованных турбулентных пятен в стратифицированной жидкости;
- участие в проведении лабораторных и натурных испытаний измерительного комплекса «Сигма-1», в анализе и интерпретации результатов;
- непосредственное участие в разработке измерительной системы для приповерхностного слоя;
- выбор методов и средств исследования при проведении натурных экспериментов на океанографической платформе, разработка методик;
- непосредственное участие при сборе, обработке и анализе натурных данных;
- разработка методов анализа, создание программных продуктов для обработки и анализа экспериментальных данных;
- анализ и интерпретация результатов исследований.

Материалы, представленные в диссертации, получены в процессе многолетних исследований, в которых автор принимал непосредственное участие, при проведении комплексных экспериментов осуществлял их научное планирование и руководство измерениями.

Разработка и создание приборов и технической базы для экспериментальных исследований осуществлялось коллективом сотрудников при непосредственном участии автора. Основная часть экспедиционных исследований проведена также при непосредственном участии и под руководством автора. Безусловно, подготовка и проведение многочисленных экспериментов, обработка обширных массивов информации были бы невозможны без участия коллектива сотрудников и их высокого профессионализма.

В совместных исследованиях взаимодействия пограничных слоев моря и атмосферы автору принадлежат постановка задачи, а также идея, методы и реализация комплексной обработки данных синхронных измерений в двух средах.

В исследованиях турбулентного обмена в стратифицированных слоях идея экспериментов и метод анализа предложены научным консультантом, вклад автора состоял в сборе и обработке экспериментальных данных, в развитии методов обработки и численном моделировании, в обсуждении и анализе результатов.

Доля участия и вклад автора во всех совместных работах и публикациях подробно сформулированы в специальной справке.

Апробация полученных результатов. Результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

Научн. конф. «Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суши и моря», 29 сент. – 3 окт., Севастополь – Кацивели, 1997 г.

Междунар. научн.-техн. семинар «Системы контроля окружающей среды-2004», 25 – 27 мая, Севастополь, 2004 г.

Междунар. научн.-техн. семинар «Системы контроля окружающей среды-2005», 19 – 23 сентября 2005 г., Севастополь.

Междунар. научн. конф. «Фундаментальные исследования важнейших проблем естественных наук на основе интеграционных процессов в образовании и науке», 19 – 24 авг., Севастополь, 2006.

Пятая всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2007 г.

Междунар. научн.-техн. семинар «Системы контроля окружающей среды-2008», 15 – 19 сентября 2008 г., Севастополь;

Семинар факультета математики и прикладной кибернетики FSU, Jena, Germany, October. 2009.

Междунар. научн. семинар «Oscillating processes in mathematics and hydrophysics» June, 12 – 14, 2010, Sevastopol (Ukraine).

Междунар. научн. конф. «Функционирование и эволюция экосистем Азово-Черноморского бассейна в условиях глобального изменения климата», г. Севастополь – п. Кацивели, 6 – 11 сент. 2010 г.

Междунар. научн. семинар «Smoothness, Approximation, and Function Spaces», Oppurg/Thür. (Germany), October 10 - 16, 2010.

Украино-российский научн. семинар «Динамические процессы на шельфе Черного моря», п. Кацивели, 5 – 8 июля 2011 г.

Российско-украинский семинар «Взаимодействие атмосферы и океана: физические процессы в окрестности поверхности раздела», Москва, ИО РАН, 22 – 24 ноября, 2011 г.

Теоретические семинары Морского гидрофизического института и семинары отдела турбулентности.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 30 публикациях. 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.

Структура диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех разделов, Заключение и Списка литературы. В диссертации 274 страницы машинописного

текста, который включает 99 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 202 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **Введении** определена тема работы, обосновывается ее актуальность, показана связь с научными программами и проектами, формулируются цель и задачи исследования, новизна полученных результатов и их практическая значимость, указан личный вклад соискателя и объем публикаций по теме диссертации.

В **Разделе I** описаны применявшаяся измерительная аппаратура, методы экспериментальных исследований, обработки и анализа данных, а также проводившиеся натурные эксперименты.

В начале раздела изложены основные этапы экспериментального изучения турбулентности в океане и использования специализированной аппаратуры. Начиная с работ канадских ученых [Grant et al., 1962], которыми были сделаны первые натурные измерения турбулентности, важнейшими вехами можно считать исследования, проводившиеся советскими океанологами – Колесниковым и его сотрудниками [Колесников и др., 1970, 1972, Дыкман и др., 1978], Мониным, Озмидовым [Монин, Озмидов, 1981] и многими другими. Первостепенное значение в изучении турбулентных процессов в океане имеет измерительная аппаратура, ее быстродействие и точность. Развитие инструментальной базы открывает новые возможности для исследований, поэтому созданию современных высокоточных приборов с широким набором измеряемых параметров всегда уделялось большое внимание. Использование высокоразрешающих датчиков с частотой опроса несколько сотен герц дает возможность исследовать тонкую структуру и микроструктуру океана вплоть до интервала диссипации. В обзоре [Lueck, 2002] описаны наиболее известные измерительные зондирующие устройства, использовавшиеся в разных странах для исследования турбулентности в верхних слоях моря, а также сформулированы основные требования, которые предъявляются к измерениям подобного рода в океане.

Особое место в изучении морской турбулентности занимают исследования вблизи поверхности океана, поскольку сопряжены со сложностями из-за наличия мощных волновых возмущений. Измерения волновых и турбулентных пульсаций скорости, проводившиеся в натурных условиях сотрудниками Морского гидрофизического института [Ефимов, Христофоров, 1971, Ефимов, Кушнир, 1974, Ефимов, Соловьев, 1975], показали сложный характер взаимодействия волновых и турбулентных движений, наличие нерезонансного нелинейного взаимодействия поверхностных волн, ряд других эффектов. Исследования турбулентности в нескольких верхних метрах океана проводились со специализированных стационарных платформ [Terray et al., 1996; Donelan et al., 1999], с плавучих буйев [Gemmrich, Farmer, 1999, 2004], с борта НИС [Soloviev et al., 1998, 1999, 2003], важные результаты получены в работах [Babanin, 2001, 2007].

Во втором параграфе первого раздела описана аппаратура, применявшаяся нами в исследованиях турбулентных процессов в деятельном слое моря. Специфика разных слоев – приповерхностного и более глубокого стратифицированного – предполагает применение разных подходов к измерению турбулентных характеристик. Созданный новый измерительный комплекс «Сигма-1» ([Дыкман и др., 2004; Самодуров и др., 2005]) 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. Основные технические характеристики прибора приведены в Таблице 1.

Для исследования турбулентности в слоях глубиной 10 – 100 м с борта НИС применяется зондирующий вариант комплекса (рис. 1), позволяющий получать профили измеряемых величин в режиме свободного падения, которое происходит со скоростью около 0,7 м/с, блок датчиков при этом располагается внизу. Измерения вблизи поверхности моря на глубинах 0 – 20 м производятся с неподвижного основания (платформы) позиционным прибором (рис.2.), который фиксируется на выбранном горизонте с помощью оригинальной системы подвеса [Пат. 102129, 2013], чувствительные элементы при этом расположены в верхней части корпуса. Эта система обеспечивает устойчивое положение прибора и возможность оперативно менять горизонт измерений. При измерениях в приповерхностном слое моря использовался также векторно-осредняющий измеритель скорости течения «Восток-М» для регистрации модуля и направления среднего течения и средних значений температуры и электропроводности на выбранном горизонте.

Таблица 1

Технические характеристики измерительного комплекса «Сигма-1»

Измеряемые параметры	Диапазон	Разрешение	Точность	Дискретность измерений
Три компоненты вектора пульсаций скорости, м/с	± 2	10^{-3}	$\pm 10\%$	По всем каналам 100 Гц
Температура, °С	0 – 30	0,001	$\pm 5\%$	
Электропроводность, отн.ед.	0 – 0,9	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 5\%$	
Три компоненты линейных ускорений, м/с ²	± 20	0.002	0.002	
Крен и дифферент прибора	$\pm 20^\circ$	$0,01^\circ$	$\pm 1^\circ$	
Угол азимута прибора	0 – 360°	10°	$\pm 5^\circ$	
Давление, МПа	0 – 1	$5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 1\%$	

Исследования физических процессов в приповерхностном слое моря требуют измерений большого набора различных характеристик. Поэтому основная часть натурных экспериментов проводилась в тесной кооперации с сотрудниками других отделов МГИ и Лаборатории взаимодействия атмосферы и океана Института физики атмосферы РАН.

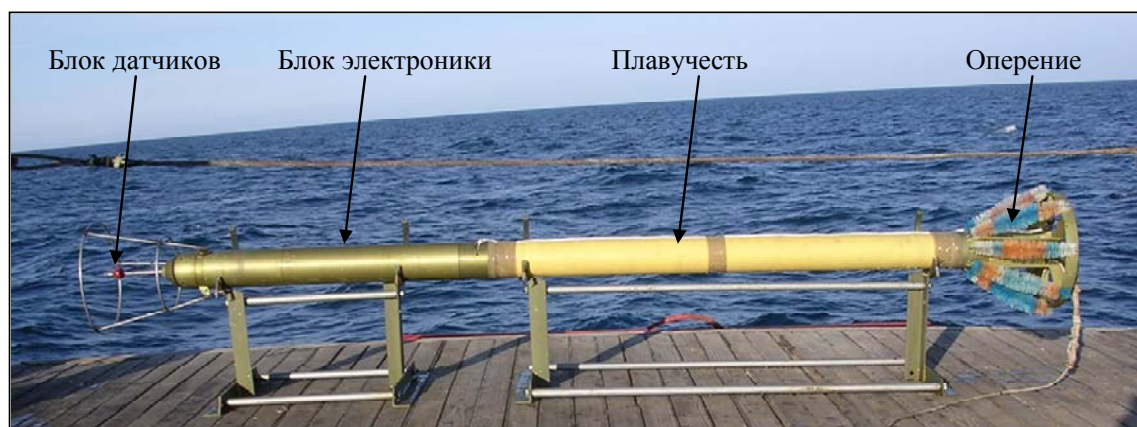


Рис. 1. Измерительный комплекс «Сигма-1». Зондирующий вариант

Для комплексного анализа данных и установления зависимостей интенсивности турбулентности от определяющих факторов нам были предоставлены данные о характеристиках поверхностного волнения, направлении и скорости ветра, измеряемые сотрудниками отдела дистанционных методов исследования (ОДМИ) МГИ. Информация о турбулентных потоках в приземном слое атмосферы, о скорости ветра, профилях температуры воздуха и ряде других параметров предоставлялась сотрудниками ИФА РАН в рамках научно-технического сотрудничества.



Рис. 2. Измерительный комплекс «Сигма-1». Позиционный вариант

Поскольку комплекс «Сигма-1» осуществляет измерения пульсаций скорости в системе координат прибора, а последний меняет свое положение относительно земли, автором были разработаны алгоритмы и созданы программы коррекции измеренных компонент пульсаций скорости для устранения помех от собственных колебаний прибора [Чухарев, 2010]. С учетом показаний акселерометров компоненты вектора скорости пересчитываются в неподвижную систему отсчета, и производится обработка данных фильтром Винера, который может использоваться как во временной области, так и в частотной. В результате получаются достаточно «чистые»

данные пульсаций скорости в водной среде, не когерентные с собственными движениями прибора. Эффективность предложенного метода демонстрируется на примерах.

Большой объем получаемой информации требует оперативной, в том числе и сложной обработки результатов измерений для оценки хода экспериментов и качества данных. С этой целью, а также для последующего научного анализа данных 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.

В заключительном параграфе первого раздела описаны проводившиеся эксперименты на океанографической платформе МГИ и с борта НИС, дается характеристика полигонов сбора данных. Кратко изложены основные методики измерений турбулентных характеристик в приповерхностном слое позиционным вариантом комплекса «Сигма-1» и в верхнем стратифицированном слое – зондирующим вариантом комплекса.

Второй раздел посвящен описанию разработанных моделей турбулентного обмена в приповерхностном слое моря.

В обзорной части раздела изложены основные подходы к моделированию турбулентных течений, делается краткий анализ методов замыкания систем уравнений, условий их применения. Отмечается, что широкое применение для расчетов многих типов течений нашли так называемые $k-\varepsilon$ модели, 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 [Роди, 1984; Бруяцкий, 1986].

Применительно к моделированию приповерхностного слоя моря анализируются имеющиеся в настоящее время модели, основанные на различных типах замыкания и учитывающие те или иные механизмы генерации турбулентности вблизи поверхности моря. В качестве основных источников турбулентности здесь рассматриваются, как правило, сдвиг скорости дрейфового течения, поверхностные волны и их обрушение [Монин, Озмидов, 1981]. Для приповерхностного слоя наиболее употребительной к настоящему времени является модель [Craig, Banner, 1994], в которой скорость диссипации и кинетическая энергия турбулентности выражаются через масштаб скорости и масштаб турбулентности l , причем последний определяется через глубину и параметр шероховатости z_0 . В более поздних моделях обрушение волн рассматривается уже как объемный источник турбулентности [Мадерич, Бровченко, 2003, Kudryavtsev et al., 2008].

Все же, несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования приповерхностного слоя, пока нет удовлетворительного объяснения механизмов взаимодействия ветра, волн и течения, не до конца ясен ответ на вопрос о фактическом вкладе каждого из механизмов генерации турбулентности в вертикальный обмен и, соответственно, отсутствует их адекватная параметризация [Belcher et al. 2012].

Для описания турбулентной структуры вблизи поверхности моря в условиях умеренного волнения и небольших скоростях ветра автором [Чухарев, 2003] была создана модель на основе k - ε модели, доработанной с учетом представлений о взаимодействии волновых и турбулентных движений, описанных в [Kitaigorodskii, Lumley, 1983]. При этом в модели учитываются два механизма генерации турбулентности: сдвиг скорости дрейфового течения и поверхностные волны без обрушений. Уравнение баланса турбулентной энергии у поверхности моря записывается в виде:

$$\frac{\partial E_t}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial E_t}{\partial x_k} = -\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{1}{\rho} (\overline{u'_k p'}) + \overline{E_t u'_k} - \nu \frac{\partial E_t}{\partial x_k} + \overline{E_w u'_k} \right] - \mu \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right)^2}, \quad (1)$$

где $E_t = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ – кинетическая энергия турбулентного движения, u'_i – компоненты пульсационного движения вдоль соответствующих координат x_i ($i = 1, 2, 3$), ρ – плотность, p' – пульсации давления, $E_w = \overline{u'^2} / 2$ – энергия орбитального движения частиц, μ – молекулярная вязкость. От обычного вида это уравнение отличается добавочным членом $\overline{E_w u'_k}$, представляющим турбулентный перенос волновой кинетической энергии. Уравнение баланса энергии дополняется уравнением для скорости диссипации энергии, в общем виде записываемое как [Роди, 1984]

$$\frac{\partial \varepsilon_t}{\partial t} + v_k \frac{\partial \varepsilon_t}{\partial x_k} = -\frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_k \varepsilon_t}) - 2\mu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} - 2 \overline{\left(\mu \frac{\partial^2 u'_i}{\partial x_k \partial x_k} \right)^2}, \quad (2)$$

а также соотношением для коэффициента турбулентного обмена, который выражается через E_t и ε : $\nu_t = \alpha_1 E_t^2 / \varepsilon$, где α_1 – числовая константа. Данная система приводилась к модельному виду с учетом широко используемых параметризаций [Роди, 1984] и с соответствующими граничными условиями решалась численно.

На основании проведенного моделирования и сопоставления с экспериментами были сделаны следующие выводы:

– предложенная модель применима для расчета характеристик турбулентности в приповерхностном слое моря в нештормовых условиях, при слабом и умеренном волнении и умеренных скоростях ветра;

- подбором всего лишь одного коэффициента, характеризующего приток энергии к турбулентности от поверхностных волн, в модели удастся получить удовлетворительное согласие расчетных и натурных данных;
- в указанных гидрометеорологических условиях учет двух механизмов генерации турбулентности позволяет рассчитывать характеристики турбулентности в слое, подверженном влиянию волн, ниже турбулентность аналогична пристеночному слою, что также описывается данной моделью;
- влияние волн сказывается лишь непосредственно вблизи поверхности, до глубины, составляющей примерно 3 – 4 высоты волны;
- модель заметно лучше согласуется с экспериментом, когда рассчитываемые по эмпирическим формулам параметры волнения были близки к фактическим, измеренным инструментально;
- при наличии обрушивающихся волн данная модель уже не дает достаточно хорошего совпадения с экспериментом.

При незначительном волнении более существенным механизмом генерации турбулентности в исследуемом слое, по всей видимости, является сдвиг скорости течения, затем, с развитием волн, влияние последних вблизи поверхности становится преобладающим. Еще более мощным механизмом является обрушение волн. В случае возникновения этого явления энергия турбулентности резко возрастает, и моделирование в такой гидрометеорологической ситуации требует иного подхода.

В третьем параграфе второй главы рассматривается модель, в которой автором применена другая концепция [Чухарев, 2013], и учитываются уже три основных механизма генерации турбулентности в приповерхностном слое, включая обрушение волн, а также разномасштабность этих механизмов.

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. Хотя общепринято, что существует целый спектр масштабов турбулентных пульсаций, в большинстве одноточечных моделей рассматривается только один временной масштаб, что является сильным упрощением.

Основываясь на концепции [Ханьялич и др., 1983], предлагается энергетический спектр турбулентности разделить на 4 участка (рис. 3), в которых последовательно происходит генерация турбулентности разными механизмами, ее инерционный перенос в область более высоких волновых чисел и диссипация. Будем считать, что производство турбулентной энергии происходит в областях 1 и 2, которые характеризуются соответствующими уровнями энергии E_{P1} и E_{P2} , часть энергии из этих областей трансформируется со скоростями ε_{P1} и ε_{P2} в энергию пульсаций меньших масштабов, пополняя энергию в участках 2 и 3 соответственно. В диапазоне волновых чисел $k_2 \leq k \leq k_3$ происходит перенос энергии со скоростью ε_{T3} , уровень энергии на этом участке обозначен через E_{T3} , данный участок считается инерционным, генерации турбулентности в нем не происходит. Четвертый участок спектра является диссипативным, он лежит в области волновых чисел $k \geq k_3$. В

первом диапазоне масштабов турбулентность генерируется сдвигом скорости дрейфового течения, во втором – поверхностными волнами и их обрушениями. На схеме эти поступления энергии обозначены через P_1 и P_2 соответственно. Полагаем, что полная энергия турбулентности распределена между участками 1 – 3, в четвертом участке находится пренебрежимо малая часть энергии.

Используем для всех диапазонов k – ε модель с двумя уравнениями, которая хорошо работает в случае развитой турбулентности. Для упрощения будем считать течение стационарным и горизонтально однородным, молекулярной вязкостью и силой Кориолиса пренебрегаем. Поскольку турбулентность предполагаем развитой, локально изотропной, пульсациями давления также можно пренебречь [Монин, Яглом, 1968]. Модельная система уравнений для первого участка записывается в виде

$$\nu_1' \left(\frac{dU}{dz} \right)^2 + \frac{d}{dz} \left(\frac{\nu_1'}{\sigma_E} \frac{dE_{P1}}{dz} \right) - \varepsilon_{P1} = 0, \quad (3)$$

$$C_1 \frac{\varepsilon_{P1}}{E_{P1}} \nu_1' \left(\frac{dU}{dz} \right)^2 + \frac{d}{dz} \left(\frac{\nu_1'}{\sigma_\varepsilon} \frac{d\varepsilon_{P1}}{dz} \right) - C_2 \frac{\varepsilon_{P1}^2}{E_{P1}} = 0, \quad (4)$$

где $U = [U(z), 0, 0]$ – скорость горизонтального дрейфового течения, $\nu' = C_\mu E^2 / \varepsilon$ – коэффициент турбулентной вязкости, $C_\mu \approx 0.09$, σ_E , σ_ε и C_i – константы. Физический смысл членов, входящих в уравнение (3): первый описывает генерацию турбулентности сдвигом скорости течения, следующий – диффузию турбулентной кинетической энергии, третий – скорость переноса энергии во второй диапазон масштабов. В уравнении (4) первый член описывает производство диссипации, второй – диффузию и третий – перенос диссипации. Профиль скорости полагаем близким к логарифмическому, граничные условия принимаем следующими:

$$E_{P1} = E_{01}, \quad \varepsilon_{P1} = \varepsilon_{01} \quad \text{при } z = 0, \quad \frac{dE_{P1}}{dz} = \frac{d\varepsilon_{P1}}{dz} = 0 \quad \text{при } z \rightarrow \infty.$$

Во втором диапазоне источниками турбулентной энергии считаются приток энергии из первого диапазона, поверхностные волны и их обрушения, сток энергии происходит в третий диапазон. Приток энергии от волн выражается из уравнения баланса волновой энергии [Kudryavtsev, Makin, 2004] и параметризуется через ее градиент, волновыми напряжениями вида $\tilde{y}\tilde{w}$ пренебрегается ввиду их малости по сравнению с турбулентными напряжениями [Cheung, Street, 1988]. Генерация турбулентности обрушивающимися волнами qP^{br} , где q – вероятность обрушений, находится из рассмотрения отдельного события обрушения волны. Базируясь на модельном представлении скользящего буруна как движения аэрированной струи [Longuet-Higgins, Turner, 1974], коэффициент турбулентной вязкости и энергия в зоне обрушения выражаются через фазовую скорость спектрального пика волнения

c_p и ширину гребня обрушившейся волны [Чухарев, Котовщиков, 2000]. Для упрощения волнение считается двумерным, необходимые величины определяются из линейной теории и эмпирических соотношений. Таким образом, учет обрушивающихся волн в качестве источника турбулентной энергии производится в зависимости от гидрометеорологических условий и характеристик волнения, сам источник оказывается распределенным по вертикали, а его мощность зависит от глубины ($P^{br} \sim z^{-2.8}$).

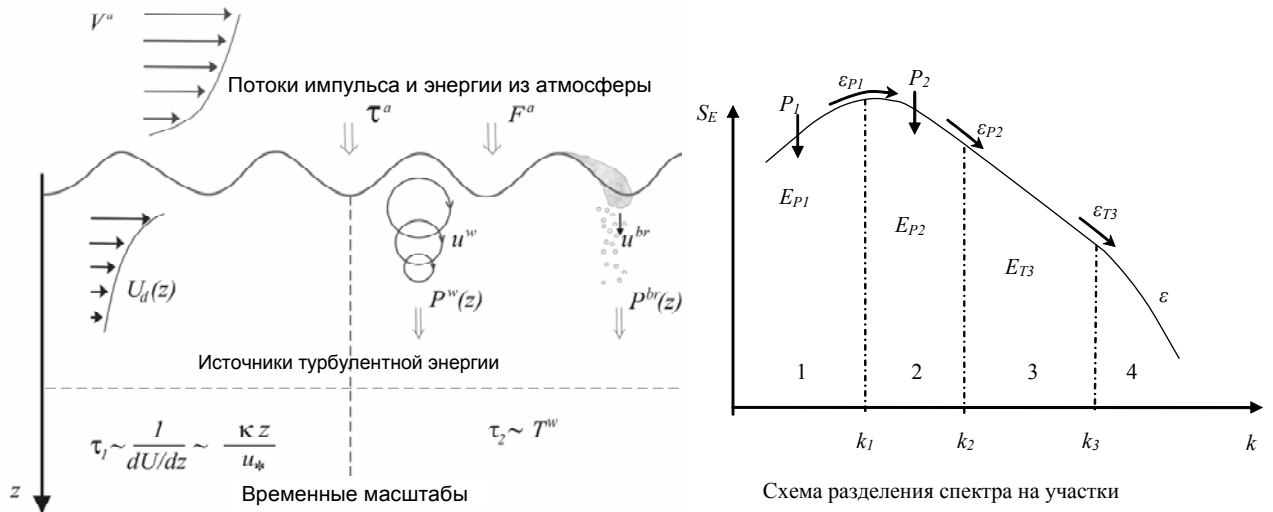


Рис. 3. Источники турбулентной энергии в приповерхностном слое, рассматриваемые в модели (слева) и разделение спектра на участки. V^a – скорость ветра, U_d – скорость дрейфового течения, τ^a и F^a – потоки из атмосферы импульса и энергии соответственно, u^w – скорость орбитального движения в волне, u^{br} – вертикальная скорость обрушившейся части волн, P^w и P^{br} – приток энергии к турбулентности от поверхностных волн и от их обрушений, T^w – период волнения

Из первого диапазона масштабов в третий диапазон энергия напрямую не поступает, приток энергии происходит только из второго диапазона, здесь она через каскадный процесс переносится в область малых масштабов, в диапазон диссипации. В третьем диапазоне генерации турбулентности нет, интервал считается инерционным, используется система уравнений, аналогичная (3), (4), в которой в качестве источника турбулентности выступает ε_{P2} . В четвертом диапазоне происходит диссипация энергии, т.е. вся энергия, покидающая третий диапазон, диссипирует: $\varepsilon_{T3} - \varepsilon = 0$. Все системы уравнений решались совместно численным методом, линеаризация уравнений осуществлялась путем выражения v_i через энергию и скорость диссипации. Использовался метод прогонки, с помощью итераций достигалось устойчивое решение.

Верификация модели и подбор коэффициентов производились по наилучшему соответствию натурным данным, полученным нами и другими исследователями в

приповерхностном слое при различных гидрометеорологических условиях. Коэффициенты считались универсальными для первого и для третьего диапазонов, для первого диапазона они брались с учетом рекомендаций [Роди, 1984], подбор сводился к нахождению констант для второго диапазона и установлению их зависимости от параметров волнения. Найденные коэффициенты, характеризующие приток энергии от волн, хорошо описываются линейной зависимостью от фазовой скорости волн спектрального пика (рис. 4) с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0.79$. Сравнение модельных расчетов с экспериментами и с другими моделями показало, что многомасштабная модель в целом хорошо описывает распределение ε по глубине в различных метеорологических условиях, преимущество предложенного метода особенно наглядно проявляется при сильных ветрах, в штормовых условиях (рис. 5). В случаях несоответствия модели и эксперимента почти всегда можно было указать на причину, обуславливающую расхождения: существование повышенных локальных градиентов скорости течения, встречные направления ветровых волн и зыби, появление ленгмюровской циркуляции и проч.

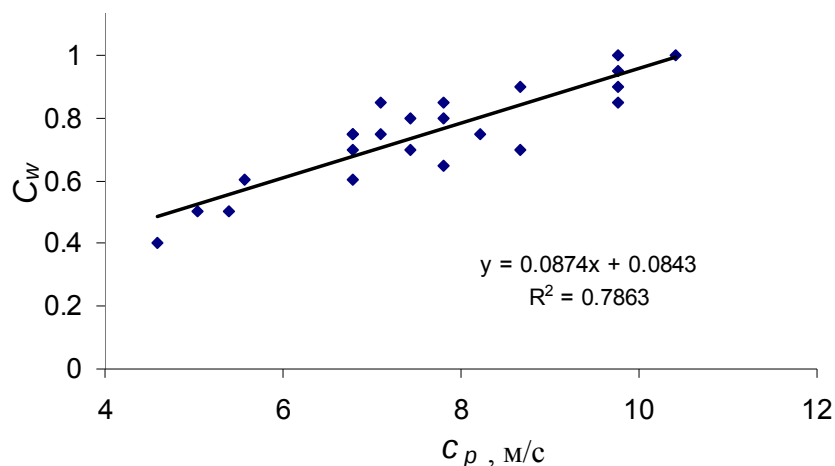


Рис. 4. Коэффициент C_w , характеризующий приток энергии от волн к турбулентности в зависимости от фазовой скорости волн спектрального пика C_p

Расчеты по другим моделям в этих случаях также не совпадали с экспериментом. Хотя разработанная многомасштабная модель и не является полностью адаптированной ко всем сложным гидрометеорологическим условиям, которые встречаются на практике, в случаях, когда турбулентность главным образом определяется тремя основными механизмами генерации, которые учитываются в модели, соответствие расчета и эксперимента хорошее.

В работе определены также направления для совершенствования модели: учет других источников турбулентности и введение новых членов в уравнения в соответствующих диапазонах спектра при глубоком понимании физики различных процессов на данных масштабах, объективный подбор коэффициентов в каждом диапазоне, основанный на широком привлечении экспериментальных данных. Еще одна возможность развития модели – использование при необходимости большего

числа диапазонов при разбиении спектра, что может потребоваться, например, для параметризации циркуляций Ленгмюра.

В последнем, четвертом параграфе второго раздела проводится сопоставление различных моделей для приповерхностного слоя с экспериментальными данными, полученными на протяжении ряда лет в натурных экспериментах на океанографической платформе МГИ в п. Кацевели. В ряде случаев, главным образом, при умеренных скоростях ветра, модели [Craig, Banner, 1994], [Kudryavtsev et al., 2008], [Чухарев, 2013] удовлетворительно или хорошо соответствовали измерениям, при сильных ветрах, включая штормовые условия, лучше других работает многомасштабная модель. Все же имеется немало случаев, когда ни одна из моделей не описывала должным образом распределение ε по глубине. Гидрометеорологические ситуации, когда это наблюдается, можно охарактеризовать следующим образом:

- 1) слабый ветер и незначительное волнение;
- 2) несколько систем волнения и наличие зыби;
- 3) неустановившееся волнение и/или нестационарный режим турбулентности;
- 4) разное направление (особенно встречное) ветра, волнения и течения;
- 5) наличие циркуляций Ленгмюра.

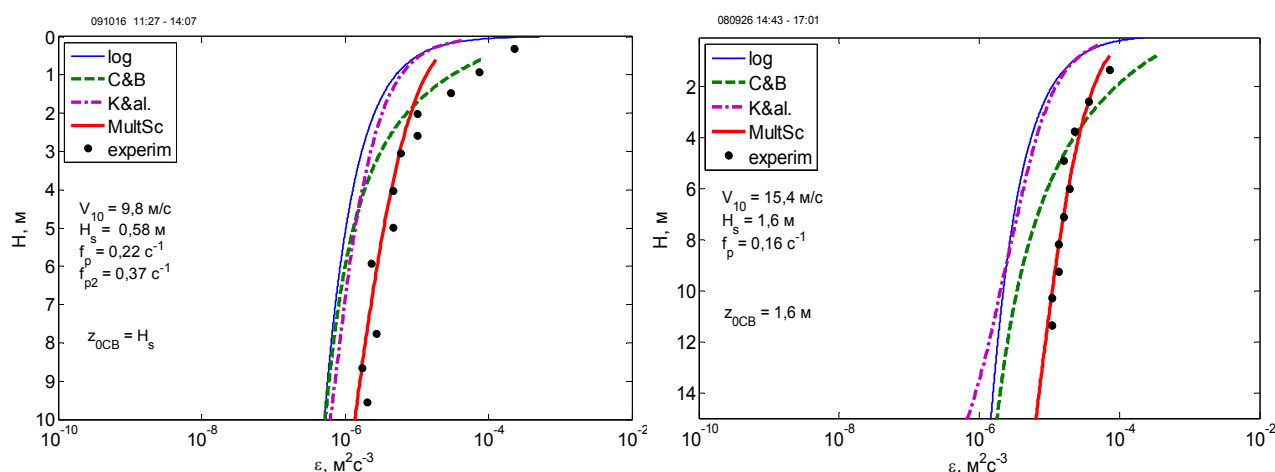


Рис. 5. Зависимость скорости диссипации турбулентной энергии от глубины: сравнение модельных и экспериментальных данных. Точки – экспериментальные величины, *log* – модель пристеночной турбулентности, *C&B* – модель [Craig, Banner, 1994], *K&al.* – модель [Kudryavtsev et al., 2008], *MultSc* – многомасштабная модель [Чухарев, 2013], V_{10} – скорость ветра на высоте 10 м, H_s – высота значительных волн, f_p – частота волн спектрального пика, z_{0CB} – параметр шероховатости в модели *C&B*

Таким образом, рассмотренные модели не всегда могут служить надежным инструментом для оценки интенсивности турбулентности вблизи поверхности моря. Например, при слабых ветрах расчетные значения скорости диссипации во всех моделях могли отличаться от экспериментальных на 2 – 3 порядка величины. На

основании проведенного анализа сформулированы предложения по совершенствованию моделей для приповерхностного слоя:

- максимально полный учет источников турбулентности;
- включение в рассмотрение механизмов взаимодействия волнения, турбулентности и течения, учет влияния зыби;
- учет циркуляций Ленгмюра;
- включение в модели потоков тепла и плавучести;
- физически обоснованный выбор модельных констант и установление их зависимости от сравнительно просто измеряемых или рассчитываемых параметров;
- по возможности учет региональных и локальных особенностей структуры течения.

Третий раздел диссертации посвящен исследованию нестационарных турбулентных процессов вблизи поверхности моря.

Во вводной части раздела отмечается недостаточная изученность отдельных аспектов динамического взаимодействия двух сред и сложность турбулентного режима вблизи границы раздела из-за влияния большого количества факторов. Второй важный аспект, который требует дополнительного изучения – структура турбулентности в пограничных слоях моря и атмосферы. Относительно крупномасштабные образования, возникающие во многих течениях и определяемые как когерентные структуры, могут играть существенную роль в потоках тепла, импульса и вещества внутри слоев и, соответственно, влиять на обменные процессы. Поскольку такие детерминированные структуры могут переносить до 80% от всей энергии турбулентного течения [Гарбарук, 2012], в настоящее время исследованию этого явления уделяется повышенное внимание [Хлопков, 2002].

Экспериментальные исследования турбулентных характеристик в сопряженных слоях моря и атмосферы проводились в течение ряда лет отделом турбулентности МГИ в тесном сотрудничестве с ОДМИ МГИ и с Институтом физики атмосферы РАН. Работы велись на океанографической платформе МГИ в п. Кацивели. Это дало важную обширную информацию о физических характеристиках обеих сред и возможность осуществлять комплексный анализ данных [Repina, Chukharev, 2009, Чухарев, Репина, 2010, 2012, Repina et al., 2012].

Для анализа натурных измерений, кроме обычных корреляционных и спектральных оценок, применялся вейвлет-анализ [Чухарев, Репина, 2012]. Этот метод, в частности, позволяет выявлять распределение энергии измеряемых величин по масштабам и проследить ее эволюцию, одинаково хорошо выделяет как низкочастотные, так и высокочастотные характеристики сигнала на разных временных масштабах [Астафьева, 1996, Torrence, Compo, 1998]. Кроме того, указанный подход позволяет анализировать данные согласно масштабу, на одном из заданных уровней (мелком или крупном). Использовалось непрерывное вейвлет-преобразование, в качестве материнского был выбран вейвлет Морле. Эта функция часто применяется в исследованиях турбулентности, она удобна при изучении

спектрального состава преобразуемого ряда и его изменения со временем, так как ее Фурье-образом является гауссиана, что обеспечивает хорошую частотную локализацию. Рис. 6 иллюстрирует применение спектрального и вейвлет-анализа к осредненным по 1 мин данным о динамической скорости в воздухе.

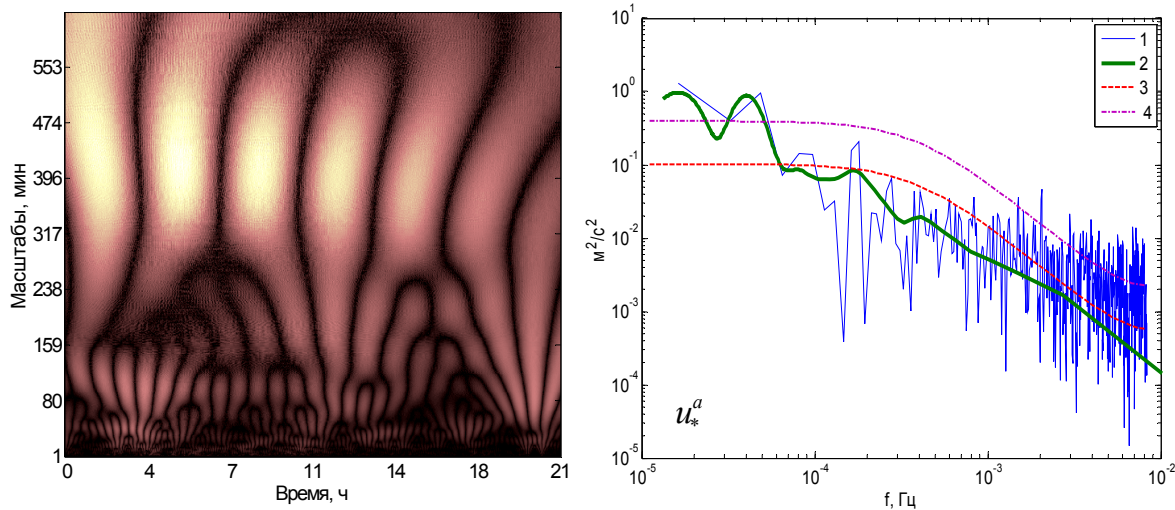


Рис. 6. Вейвлет-коэффициенты (слева) и сравнение Фурье-спектра и глобального спектра, рассчитанного по вейвлет-коэффициентам для динамической скорости ветра u_*^a , где 1 – спектр Фурье, умноженный на частоту; 2 – глобальный спектр; 3 – спектр красного шума при $\alpha = 0,86$; 4 – 95%-ный уровень значимости

Примеры рассчитанных с помощью вейвлет-преобразования глобальных спектров и эволюции во времени энергии турбулентных процессов в море и в атмосфере, изображены на рис. 7. В качестве исходных данных здесь использовались величины, осредненные по 1 мин. На рис. 7а представлены спектры для динамической скорости в воздухе и вертикальной компоненты пульсаций скорости в воде. Эволюция средней по масштабам энергии в сопряженных слоях показывает, что колебания потока импульса в приводном слое приводят к возникновению колебаний в интенсивности морской турбулентности с такой же частотой и с задержкой по времени (рис. 7б). При слабых ветрах и неразвитом волнении интенсивность турбулентности в море в значительной мере зависела также от потока тепла, колебания которого находятся в противофазе и тоже с некоторым сдвигом по времени. В зависимости от интенсивности атмосферных процессов и от глубины измерений время реакции на динамическое воздействие в наблюдавшихся случаях менялось от 1 ч до ~ 10 ч. Важной чертой, обнаруженной при анализе, является наличие в исследуемых параметрах многочасовых (субмезомасштабных) периодичностей, которые являются устойчивым признаком процессов, происходящих вблизи поверхности моря. На спектрах с максимальным масштабом

до 1 суток нами выявлены значимые пики (превосходящие уровень красного шума [Torrence, Compo, 1998]) на периодах 1 – 22 ч, количество таких пиков (внутрисуточных периодичностей) для каждого параметра обычно составляло 3 – 5. При этом в масштабах значимых периодов наблюдается определенная закономерность: каждое значение отличается от предыдущего почти строго в два, реже – в три или в четыре раза. По всей вероятности, это проявление внутреннего самоподобия, характерного для многих турбулентных движений и связываемого с когерентными структурами. Как показывает численное моделирование, периодическое воздействие создает когерентные структуры в пограничном слое и увеличивает интенсивность турбулентных движений, причем для некоторой частоты имеется максимум такого увеличения, своего рода резонанс [Kim, 2003]. На рис. 8 изображена гистограмма распределения значимых периодов для динамической скорости ветра u_*^a , среднеквадратичной вертикальной составляющей пульсаций скорости в воде w_{rms} и скорости течения U_d , построенная по наблюдениям 2005 и 2007 г.г. Чрезвычайно схожая гистограмма для направлений вдольбереговых течений в районе г. Геленджика получена в экспериментальных исследованиях [Зацепин и др., 2012]. Следовательно, есть большая вероятность, что и в районе наших измерений существуют подобные субмезомасштабные структуры, механизм их образования, по-видимому, аналогичен описанному в [Зацепин и др., 2012], причем масштабы неоднородностей в приповерхностном слое моря и в приводном слое атмосферы очень хорошо коррелируют. Относительная энергия колебаний гидрофизических параметров в наблюдаемых ситуациях может меняться в несколько раз при квазипостоянном уровне средних величин, что, безусловно, сказывается на интенсивности процессов обмена. Таким образом, нестационарность турбулентных процессов в пограничных слоях является важной чертой, которая может существенно изменять характер взаимодействия и турбулентный режим.

Учитывая наблюдаемый характер турбулентных процессов, для описания динамики приповерхностного слоя на сравнительно небольших временных масштабах была разработана нестационарная модель, соответствующая уровню 2,5 по классификации [Mellor, Yamada, 1982].

В качестве исходных уравнений используются уравнения баланса импульса и турбулентной энергии:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f_c V - \frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial z}, \quad \frac{\partial V}{\partial t} = -f_c U - \frac{\partial(\overline{v'w'})}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\left(\overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} + \overline{v'w'} \frac{\partial V}{\partial z}\right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{w'E} + \overline{w'E^w} + \frac{1}{\rho_0} \overline{w'p'}\right) - \varepsilon \quad (6)$$

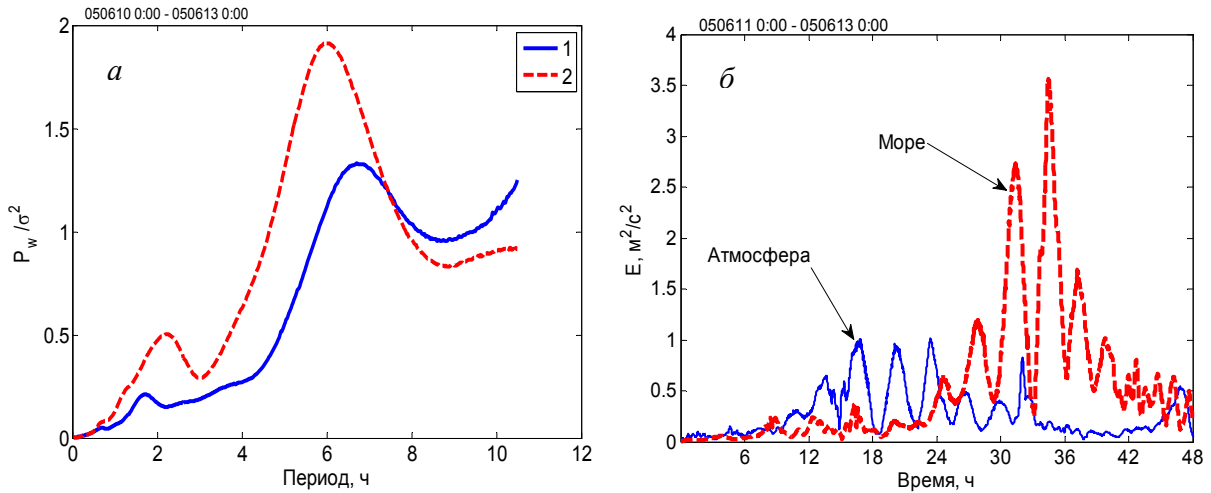


Рис. 7. Характеристики, полученные с помощью вейвлет-анализа: а) глобальные спектры, нормированные на дисперсию, 1 – динамическая скорость в воздухе u_*^a ; 2 – среднеквадратическая вертикальная компонента скорости $w_{rms} \times 10$ на глубине 1,5 м; б) изменение средней по масштабам турбулентной энергии в атмосфере и в море (оцененной по u_*^a и w_{rms} соответственно) в период развития апвеллинга 11 – 13 июня 2005 г. Период колебаний, появившихся в атмосфере, а затем в море $\sim 3,5$ ч

Здесь U и V – средние горизонтальные компоненты скорости вдоль осей x и y соответственно, f_C – параметр Кориолиса, u', v', w' – пульсационные компоненты скорости, $E = (u'^2 + v'^2 + w'^2) / 2 = q^2 / 2$ – турбулентная кинетическая энергия, E^w – энергия поверхностного волнения, p' – пульсации давления, $\varepsilon = q^3 / Bl$ – скорость диссипации, B – константа. Турбулентные потоки импульса выражаются через градиенты скорости и коэффициент турбулентного обмена, который, в свою очередь, определяется как $\nu_t = S_m l q$, S_m – константа, l – турбулентный масштаб длины. На верхней границе задается поток импульса $u_*^{w2} = \nu_t \frac{\partial U}{\partial z}$, на нижней границе компоненты скорости и поток энергии равны нулю. Основное отличие этой модели от обычно используемых (см. [D'Alessio, 1998]) – введение дополнительного члена $w'E^w$ в уравнение баланса турбулентной энергии. Система уравнений решалась численно, в качестве теста использовалось сравнение с данными о скорости диссипации турбулентной энергии, полученной в наших экспериментах и определяемой по методике, описанной во второй разделе. На рис. 9 слева приведен сравнительный расчет по нестационарной модели при постоянном и переменном внешнем воздействии. Как видим, предложенная нестационарная модель также вполне хорошо согласуется с экспериментом при учете переменного воздействия. Обращает на себя внимание и лучшее соответствие нестационарной модели экспериментальным данным в верхней части графика, вблизи самой поверхности. То

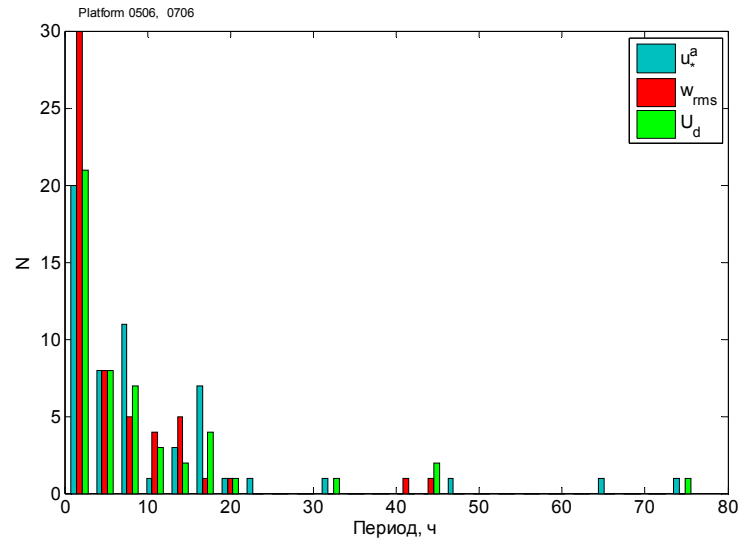


Рис. 8. Гистограмма распределения периодичностей в интенсивности колебаний в пограничных слоях моря и атмосферы в экспедиционные периоды в 2005 и 2007 г.г. u_*^a – динамическая скорость в воздухе; w_{rms} – среднеквадратические вертикальные пульсации скорости в воде; U_d – скорость течения

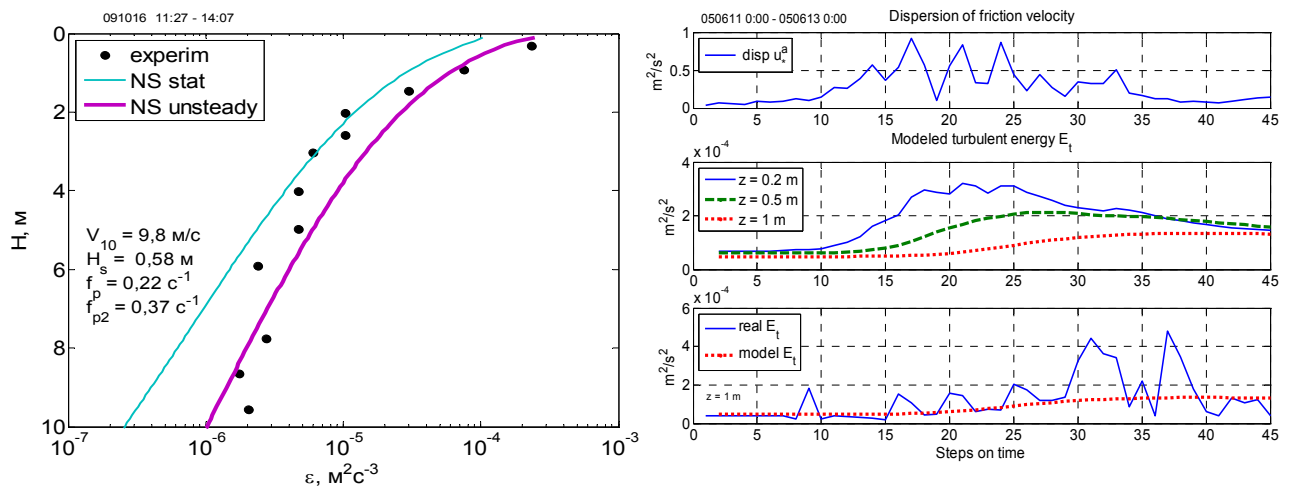


Рис. 9. Сопоставление модельных и измеренных величин в приповерхностном слое. Слева – сравнение с экспериментальными данными о скорости диссипации турбулентной энергии при различных видах внешнего воздействия на поверхность моря одинаковой продолжительности. Точки – экспериментальные значения, NS – нестационарная модель при постоянном ($stat$) и переменном ($unsteady$) воздействии. Справа сверху – измеренная дисперсия динамической скорости в воздухе, ниже – смоделированные и измеренные величины турбулентной энергии. Шаг по времени 1 час.

есть учет переменного потока импульса из атмосферы играет здесь важную роль. Справа на рис. 9 показано измеренное воздействие на поверхность моря (дисперсия

динамической скорости) за некоторый отрезок наблюдений и рассчитанное изменение турбулентной энергии на разных глубинах. Расчеты здесь также неплохо согласуются с экспериментом (нижний рисунок).

Следовательно, можно сделать вывод, что предложенная нестационарная модель в целом правильно описывает турбулентный режим под поверхностью моря и соответствует экспериментальным данным.

В четвертом разделе описаны результаты экспериментальных исследований турбулентной структуры в верхнем стратифицированном слое Черного моря в зоне сопряжения шельфа и континентального склона.

Тонкая структура и микроструктура, характерные для стратифицированных слоев океана, являются результатом действия происходящих в них сложных процессов. Механизмами, участвующими в формировании тонкой структуры океана, являются кинематический эффект внутренних волн, интрузионный обмен через фронтальные зоны, особенности рельефа дна и придонное трение, дифференциально-диффузионная конвекция, локальное перемешивание вследствие сдвиговой неустойчивости и опрокидывания внутренних волн и другие [Samodurov, Ivanov, 2003]. Многочисленные наблюдения в океане подтверждают тот факт, что турбулентность в стратифицированных течениях генерируется нерегулярными событиями нарушения устойчивости, что приводит к появлению отдельных турбулентных пятен [Hebert et al., 1992]. Турбулентное перемешивание внутри таких пятен в результате формирует вертикальные потоки тепла и массы в природных течениях. Устойчивая стратификация, затрудняя турбулентный обмен, способствует развитию интенсивных внутренних волн, поэтому наиболее вероятным источником турбулентности и микроструктуры гидрофизических полей в океане являются внутренние волны [Океанология, Т.2.].

Обратимая тонкая структура формируется собственно волнами, в то время как микроструктура локализуется в турбулентных пятнах, образующихся за счет сдвиговой неустойчивости в поле квазиинерционных (частота близка к инерционной частоте f) внутренних волн. Именно этот механизм при указанных условиях вносит основной вклад в вертикальный турбулентный обмен. Вертикальные масштабы неоднородностей меняются в широких пределах: от миллиметров до десятков метров. Разграничивающим масштабом между тонкой и микроструктурой является масштаб Озмидова L_O , который определяет максимально возможный размер локально-изотропных турбулентных вихрей при данной устойчивой стратификации среды.

Вертикальные спектры гидрофизических характеристик при небольших волновых числах (до масштабов ~ 10 м) характеризуются степенной зависимостью « -2 », затем идет спектральный интервал с наклоном « -3 », в диапазоне масштабов от 10 м до масштаба L_O . Изменение наклона спектров происходит за счет рассеяния энергии волнового поля в движения более мелких масштабов. На основе экспериментальных данных в работе [Gregg, 1977] построен осредненный спектр

градиентов пульсаций температуры (спектр первых разностей). Этот спектр в целом соответствует модели Гарретта-Манка и отражает особенности вертикальной структуры океана. Масштаб минимума спектра градиентов $L = 0,3 - 1$ м принято считать пограничным масштабом между тонкой структурой и микроструктурой в океанском термоклизе.

В работах Самодурова и соавторов [Самодуров и др., 1994; Samodurov, Ivanov, 2003] получена зависимость эффективного масштаба L турбулентных пятен, возникающих за счет сдвиговой неустойчивости и обрушения внутренних волн, от локальной частоты Брента–Вяйсяля N . Подход к определению L основан на анализе структуры спектров первых разностей флуктуаций температуры, измеренных в океане. Считается, что эффективный вертикальный масштаб природных турбулентных пятен соответствует вертикальному масштабу устойчивого минимума в мелкомасштабной области спектра [Gregg, 1989]. Метод наименьших квадратов, примененный к части данных, собранных в верхнем термоклизе, (около 400 спектров), показал, что наилучшая аппроксимация осуществляется степенной функцией, что дает соотношение

$$L = 1,4 N_c^{-1} \text{ м, } [N_c] = \text{цикл/час.} \quad (7)$$

Этот подход позволяет получить выражение для диссипации турбулентной энергии и коэффициента турбулентного обмена в широком интервале изменчивости N с привлечением полуэмпирической модели. Альтернативная зависимость для L [Самодуров и др., 1994]:

$$L \simeq 0,37 \varepsilon_s^{1/3} N_c^{-1}. \quad (8)$$

Здесь ε_s – диссипация турбулентной энергии на единицу площади. Учитывая выражение (7), мы можем записать

$$\varepsilon \simeq 8,6 \cdot 10^{-6} N_c \text{ см}^2/\text{с}^3. \quad (9)$$

Для получения оценки соответствующего коэффициента турбулентной диффузии удобно использовать соотношение Торпа

$$K = 0,25 \varepsilon N_c^{-2}, \quad (10)$$

которое имеет место в процессах вертикального обмена, происходящего из-за обрушения внутренних волн. Используя приведенные выше формулы, в конечном итоге получим:

$$K \simeq 0,93 N_c^{-1} \text{ см}^2/\text{с}. \quad (11)$$

Экспериментальные данные о тонкой структуре и микроструктуре полей скорости течения, температуры и электропроводности были получены нами при

помощи зондирований комплексом «Сигма-1» от поверхности до максимальной глубины 100 метров (рис. 10). Питание зонда и передача информации на борт судна осуществлялись по грузонесущему кабелю, прием данных велся с помощью интерфейса кабельной связи. Для улучшения статистической обеспеченности на большинстве станций зондирования дублировались. С учетом того, что прибор во время зондирования все же испытывал колебания, при спектральном анализе предпочтение отдавалось скалярной величине (пульсации температуры) по сравнению с векторной (пульсации скорости).

Для оценок характеристик вертикального турбулентного обмена в стратифицированном слое использовался метод, предложенный в работе [Самодуров и др., 1994]: на профилях выбирались участки записей с приблизительно постоянным значением величины N и рассчитывались вертикальные спектры первых разностей флуктуаций температуры (рис.11). С целью повышения статистической обеспеченности результатов анализа использовались только сравнительно длинные участки записей с диапазоном глубин не менее 15 м, удовлетворяющие требованию постоянства частоты плавучести. Также для повышения достоверности спектры рассчитывались по перекрывающимся отрезкам, при наличии нескольких зондирований на одной станции спектры усреднялись по ансамблю.

Поскольку данные измерений собраны в сравнительно узком диапазоне масштабов частоты плавучести, их аппроксимация проводилась той же степенной зависимостью, что и в работах [Самодуров и др., 1994; Samodurov, Ivanov, 2003].

Считая, что для вновь полученных данных степень при N в зависимости масштаба пятен от частоты плавучести соответствует «средней» (10), выражение для коэффициента вертикальной турбулентной диффузии приобретает вид [Иванов и др., 2008]:

$$K \cong 8,4 N_c^{-1} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}. \quad (12)$$

Сравнение выражений (11) и (12) показывает: в исследуемых районах коэффициент турбулентной диффузии почти на порядок величины превышает «среднее» значение для открытого моря при одинаковых N . Численные оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии для двух рассмотренных ситуаций получаются следующие. Полагая значение частоты плавучести 5 – 10 цикл/ч для данного диапазона глубин, будем иметь по порядку величины для коэффициента диффузии K соответственно 10^{-1} и $1 \text{ см}^2/\text{с}$. Отметим, что оценка $K \cong 2 \cdot 10^{-1} \text{ см}^2/\text{с}$ для подобных условий в среднем по Черному морю была независимо получена в работе [Ivanov et al., 2001]. Соответствующие оценки для скорости диссипации кинетической энергии составляют 10^{-4} и $10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}^3$ [Иванов и др., 2008].

На рис. 12 приведены экспериментальные оценки масштабов турбулентных пятен в зависимости от частоты плавучести по результатам всех экспедиций и «теоретическая» зависимость по [Самодуров и др., 1994].

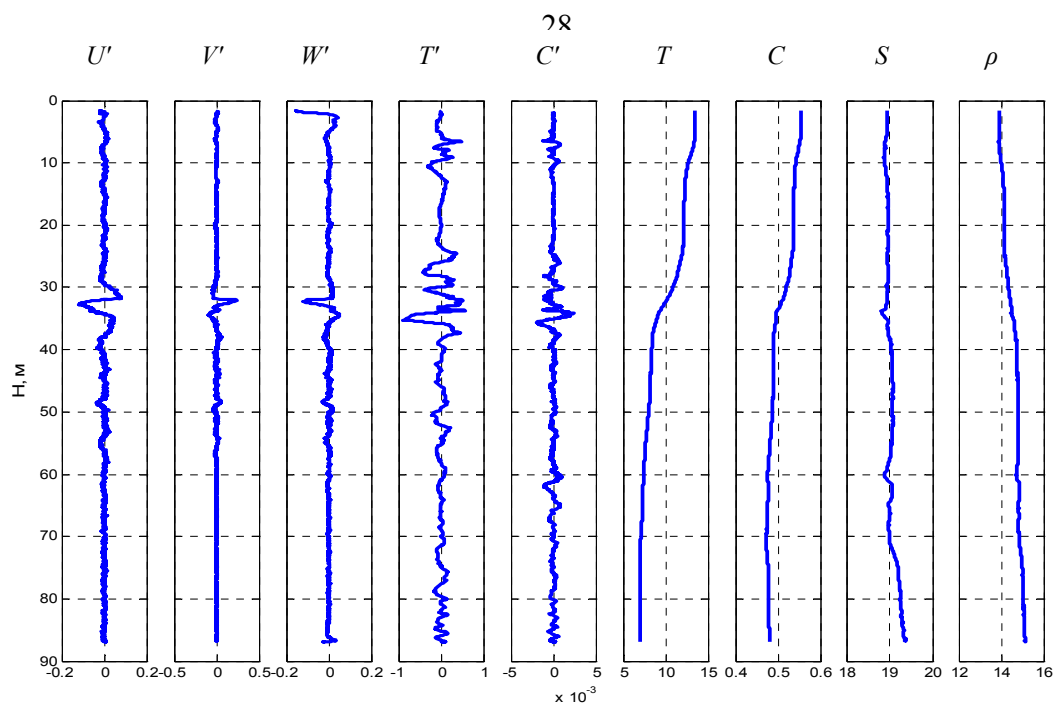


Рис. 10. Характерные профили измеренных и рассчитанных величин при зондировании измерительным комплексом «Сигма-1»: U' , V' , W' – пульсации горизонтальных и вертикальной компонент скорости, м/с, T' – пульсации температуры, °C, C' – пульсации электропроводности, отн. ед., T – средняя температура, C – средняя относительная электропроводность, S – соленость,‰; ρ – плотность, усл. ед.

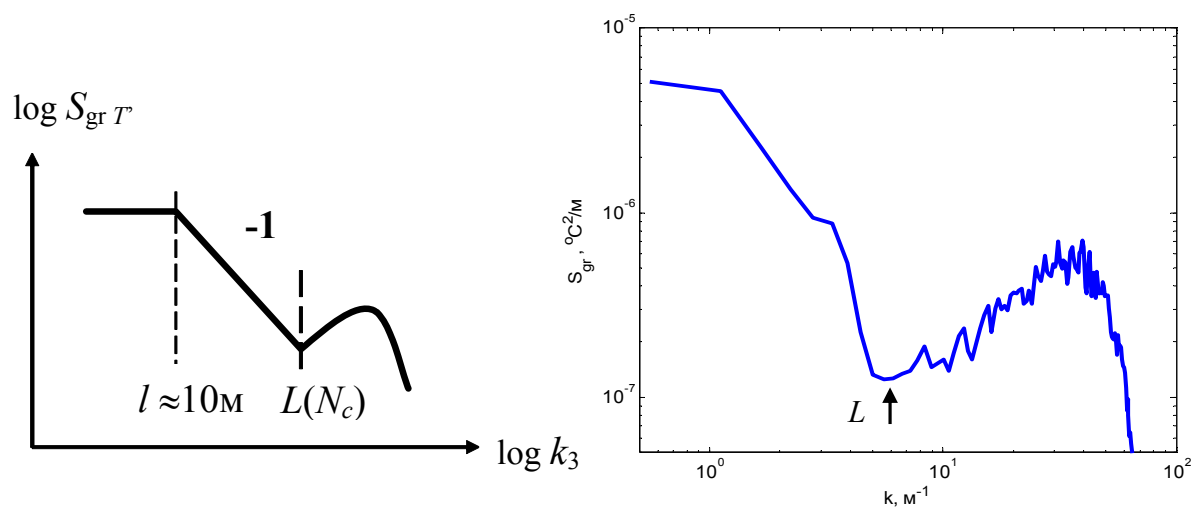


Рис. 11. Вертикальный спектр градиента пульсаций температуры: по модели [Gregg, 1989] (слева) и экспериментальный [Самодуров, Чухарев, 2008] (справа) в зависимости от вертикального волнового числа. Минимум на спектре соответствует характерному масштабу турбулентных пятен

Таким образом, экспериментально установлен факт значительного (почти на порядок) повышения коэффициента вертикального турбулентного обмена в зоне сопряжения шельфа и континентального склона по сравнению с открытой частью моря для одинаковых N . Более того, в пределах этой зоны коэффициент также непостоянен: непосредственно над кромкой шельфа он максимален, что демонстрирует рис. 13. То есть, расчет K для отдельных станций выявил характерную особенность – увеличение интенсивности турбулентного обмена в области резкого изменения глубин вдоль разреза поперек изобат.

Объясняется это, по-видимому, природой возникновения турбулентных пятен. В качестве основного механизма, обеспечивающего вертикальный обмен в исследуемом районе, рассматривается сдвиговая неустойчивость и локальное перемешивание в системе квазиинерционных внутренних волн. В результате влияния на динамику внутренних волн рельефа дна происходит повышение плотности энергии распространяющихся волн по мере приближения к берегу, что ведет в конечном итоге к потере устойчивости и обрушениям. Теоретические исследования в этом направлении [Самодуров и др., 2011, 2013] раскрывают механизм этого процесса.

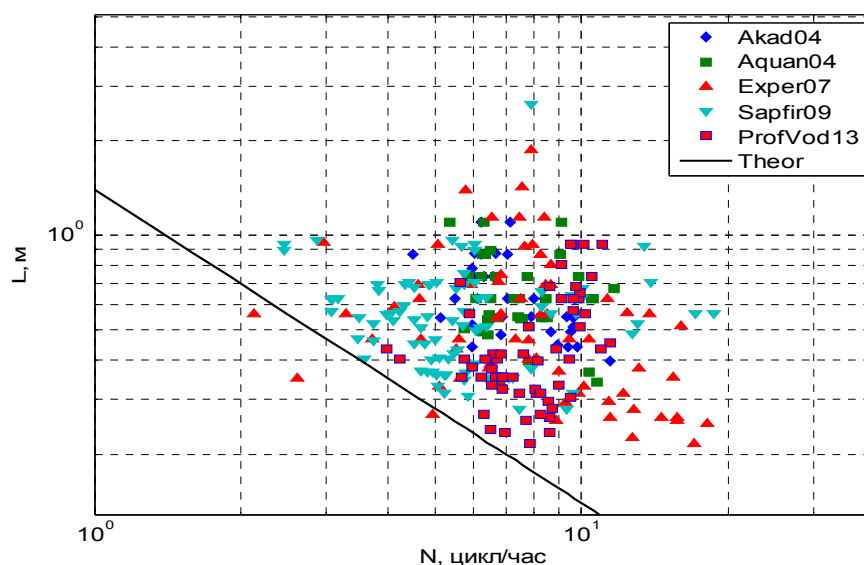


Рис. 12. Экспериментальная оценка характерного вертикального масштаба турбулентных пятен в зависимости от локальной стратификации в зоне сопряжения шельфа и континентального склона Черного моря по данным натурных измерений. Прямая линия – «средняя» зависимость, полученная по данным измерений в верхнем термоклизе глубоководной части Индийского океана и открытой части Черного моря [Самодуров и др., 1994]. Значки – экспериментальные значения, полученные в экспедициях 2004–2013 г.г.

Используя лучевой метод представления волн, можно показать, что в пучке волн, распространяющихся к берегу, амплитуда волны в пучке возрастает вместе с уменьшением ее вертикального масштаба, а это приводит к повышению вероятности сдвиговой неустойчивости и перемешивания в квазигоризонтальных стратифицированных течениях, формируемых волной [Самодуров и др., 2011, 2013].

Существенное усиление интенсивности вертикального обмена в зоне сопряжения шельфа и континентального склона по сравнению с районами открытого моря является важным уточнением характера вертикального турбулентного обмена, которое необходимо учитывать при расчетах вертикального переноса тепла, импульса или растворенных веществ в пределах исследованных районов Черного моря.

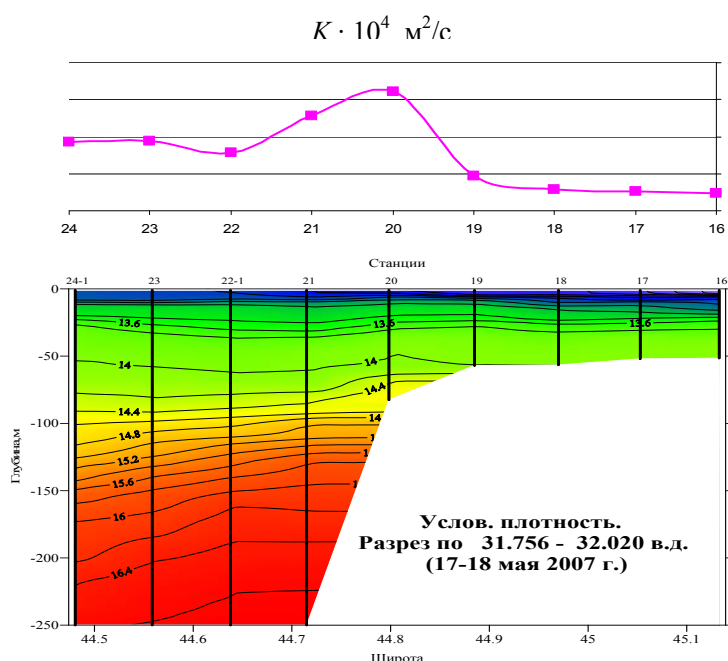


Рис.13. Изменение рельефа дна, изолинии плотности и коэффициент вертикального турбулентного обмена K вдоль разреза 3 (экспедиция на НИС «Эксперимент» 2007 г. полигон №3)

В заключительном параграфе четвертого раздела описано моделирование турбулентных пятен в стратифицированном слое в поле внутренних волн. Цель такого моделирования – проверка использовавшегося метода оценки масштабов турбулентных пятен и установление закономерностей изменения спектра при контролируемом изменении интенсивности турбулентности, размеров пятен и их количества.

Основным фактором, повышающим вероятность обрушений, является увеличение плотности энергии волн на единицу объема, т.е. число и размеры

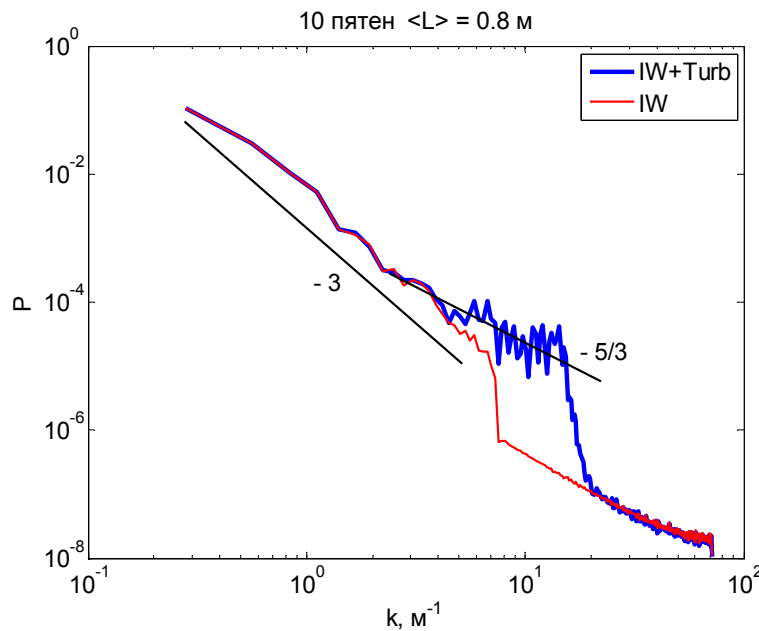


Рис. 14. Модельные энергетические спектры внутренних волн (IW) и суммарного сигнала внутренних волн и турбулентности, сосредоточенной в пределах пятен ($IW+Turb$)

турбулентных пятен будут определяться интенсивностью внутренних волн. При этом реальные профили гидрофизических характеристик отражают наличие перемешанных слоев, что наблюдалось в наших измерениях. В общем случае местонахождение таких пятен будет случайным, а их размер главным образом определяется энергией обрушившейся волны и характеризует, в конечном счете, эффективность вертикального перемешивания.

Моделирование внутренних волн и турбулентных флуктуаций, сосредоточенных в пределах пятен, проводилось гармоническими функциями с рандомизированной фазой. Для турбулентных пятен использовалась функция с компактным носителем, ограничивающая размах пульсаций пределами пятна. Модельный спектр внутренних волн с турбулентностью и в ее отсутствие приведен на рис. 14.

Расчеты показали, что имеется хорошее соответствие задаваемого среднего размера пятен с масштабами L_k , определяемыми по локальному минимуму на спектре. Таким образом, правомерность метода, использовавшегося для оценки $\bar{L}$, подтверждается моделированием. Определено также влияние количества и размеров пятен на вид спектральной функции, что необходимо для правильной интерпретации экспериментальных спектров. Характерное повышение спектра градиентов в области волновых чисел выше диапазона внутренних волн начинает проявляться уже при малом количестве пятен: 3 – 5. Рост числа пятен приводит к более явному эффекту, а увеличение размеров пятен – к смещению локального минимума в сторону меньших волновых чисел. Проведенные модельные исследования позволяют осуществлять более детальный анализ экспериментальных спектров.

Основные результаты работы кратко можно сформулировать следующим образом.

1. Для исследования мелкомасштабных процессов в приповерхностном слое моря при участии автора разработана и внедрена оригинальная измерительная система, основной элемент которой – многофункциональный комплекс, позволяющий проводить измерения средних и пульсационных гидрофизических характеристик с хорошим разрешением и с высокой точностью.

Высокое качество получаемых данных, эффективность использования измерительного комплекса и средств анализа при исследовании турбулентности в верхних слоях моря подтверждены в ходе разносторонних лабораторных испытаний и многолетней эксплуатацией в натурных условиях.

2. Натурные исследования, проведенные в течение последних 10 лет на НИС и на океанографической платформе, позволили создать массивы уникальной информации о мелкомасштабной структуре гидрофизических полей в деятельном слое моря, что является основой для получения важных эмпирических зависимостей и проверки теоретических моделей.

3. Для описания вертикального турбулентного обмена в приповерхностном слое моря разработаны одномерные стационарные модели и проведена их верификация.

Численная малопараметрическая модель, учитывающая два основных механизма генерации турбулентности, предназначена для слабых и умеренных ветров.

Создана многомасштабная модель, учитывающая три механизма генерации турбулентности, включая обрушение поверхностных волн. Установлены эмпирические зависимости модельных констант от внешних параметров, что позволяет использовать модель в широком диапазоне гидрометеорологических условий.

Модели хорошо соответствуют экспериментальным данным, преимущество многомасштабной модели по сравнению с другими существующими моделями особенно проявляется в штормовых условиях.

Определены условия применимости разработанных и других моделей, предложены направления для их дальнейшего совершенствования.

4. В интенсивности турбулентных пульсаций в сопряженных слоях моря и атмосферы выявлены статистически значимые периодичности с масштабами от одного часа до десятков часов, характерные для когерентных структур в турбулентных течениях.

5. Разработана нестационарная модель для приповерхностного слоя моря, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными и правильно описывает фазовые сдвиги и изменчивость по глубине гидрофизических параметров. Учет нестационарности динамического воздействия на поверхность моря улучшает соответствие расчетов и натурных измерений.

6. На основе экспериментальных исследований в различных районах Черного моря, с привлечением созданной ранее полуэмпирической модели вертикального

обмена, впервые установлено, что интенсивность турбулентной диффузии в зоне сопряжения шельфа и континентального склона существенно выше, чем в открытых частях моря при аналогичных условиях стратификации. Скорректированные эмпирические зависимости коэффициента вертикальной турбулентной диффузии от частоты Вейселя-Брента позволяют существенно уточнить параметризацию обмена для периферийных районов Черного моря и могут использоваться для практических расчетов.

7. Реализована статистическая модель локализованных турбулентных пятен в стратифицированном слое в поле внутренних волн. Модель подтверждает объективность оценки масштаба турбулентных пятен по минимуму спектра градиентов. С помощью моделирования исследованы влияние размеров и количества пятен, а также интенсивности турбулентности внутри пятна на форму спектра, что позволяет проводить более точный анализ турбулентной структуры в стратифицированных слоях.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Чухарев А.М.** Влияние обрушивающихся поверхностных волн на турбулентный обмен. Ныряющие буруны / А.М. Чухарев // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – № 1. – С. 31–37.
2. **Чухарев А.М.** Влияние обрушивающихся поверхностных волн на турбулентный обмен. Скользящие буруны / А.М. Чухарев, Б.Б. Котовщиков // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – № 3. – С. 13–19.
3. **Чухарев А.М.** Экспериментальная оценка скорости диссипации турбулентной энергии в слое волнового перемешивания / А.М. Чухарев, Е.Н. Ковалев // Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря. – 2001. – Вып.4. – С. 53–58.
4. **Чухарев А.М.** Вклад необрушивающихся ветровых волн и сдвига скорости дрейфового течения в турбулентный обмен / А.М. Чухарев // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 39. № 5. – С. 673–679.
5. Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования процессов перемешивания и диссипации энергии в верхнем слое моря / В.З. Дыкман, И.С. Багимов, В.А. Барабаш, О.И. Ефремов, А.Г. Зубов, В.В. Мязин, О.И. Павленко, А.С. Самодуров, **А.М. Чухарев** // Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря. – Севастополь, 2004. – Вып.10. – С. 395–409.
6. Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря / А.С. Самодуров, В.З. Дыкман, В.А. Барабаш, О.И. Ефремов, А.Г. Зубов, О.И. Павленко, **А.М. Чухарев** // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 5. – С. 60–71.
7. Самодуров А.С. Оценка интенсивности вертикального турбулентного обмена в Черном море по экспериментальным данным / А.С. Самодуров, **А.М. Чухарев** // Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря. – 2006. – Вып.14. – С. 524 – 529.

8. Турбулентная структура приповерхностного слоя моря по данным измерительного комплекса «Сигма-1» / **А.М. Чухарев**, В.А. Барабаш, А.Г. Зубов, О.И. Павленко // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 2. – С. 15–28.
9. Самодуров А.С. Экспериментальная оценка коэффициента вертикального турбулентного обмена в стратифицированном слое Черного моря в окрестности свала глубин / А.С. Самодуров, **А.М. Чухарев** // Морской гидрофизический журнал. – 2008, –№ 6. – С. 14–24.
10. Интенсификация вертикального турбулентного обмена в районах сопряжения шельфа и континентального склона в Черном море / В.А. Иванов, А.С. Самодуров, **А.М. Чухарев**, А.В. Носова // Доповіді НАН України. – 2008. – №6. – С.108–112.
11. Морская гидрографическая платформа «Кацивели» как подспутниковый полигон на Черном море / А.В. Кузьмин, Ю.А. Горячкин, Д.М. Ермаков, С.А. Ермаков, Н.Ю. Комарова, А.С. Кузнецов, И.А. Репина, И.Н. Садовский, М.Т. Смирнов, Е.А. Шарков, **А.М. Чухарев** // Исследования Земли из космоса. 2009. №1. С. 31 – 44.
12. Evolution of air–sea interaction parameters during the temperature front passage: The measurements on an oceanographic platform / I.A. Repina, **A.M. Chukharev**, Y.N. Goryachkin, N.Y. Komarova, M.N. Pospelov // Atmospheric Research. – 2009. – Vol. 94, № 1, September– P. 74–80.
13. Пат. 89308 Украина / Устройство для измерения пульсаций скорости потока жидкости / В.А. Барабаш, В.З. Дыкман, О.И. Ефремов, А.Г. Зубов, **А.М. Чухарев**, заявитель и патентообладатель Морской гидрофиз. ин-т НАН Украины – № а2008.08245 ; заявл. 18.06.08 ; опубл. 11.02.10 ; Бюлл. № 1.
14. **Чухарев А.М.** Натурные измерения диссипации турбулентной кинетической энергии в приповерхностном слое моря / А.М. Чухарев // Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря. – 2010. – Вып.21. – С. 124–135.
15. **Чухарев А.М.** Применение измерительного комплекса «Сигма-1» для исследования турбулентности на океанографической платформе / А.М. Чухарев // Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря. – 2010. – Вып.21. – С. 231 – 238.
16. **Чухарев А.М.** Комплексные натурные измерения турбулентных характеристик в слоях у границы раздела моря и атмосферы / А.М. Чухарев, И.А. Репина // Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря. – 2010. – Вып.23. – С. 75–87.
17. Ефремов О.И. Когерентные вихревые структуры в ветровых волнах по измерениям на черноморской океанографической платформе / Ефремов О.И., **Чухарев А.М.** // Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. Вып.25. Т. 2. С. 239 – 251.

18. **Чухарев А.М.** Взаимодействие пограничных слоев моря и атмосферы на малых и средних масштабах в прибрежной зоне / А.М. Чухарев, И.А. Репина // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – №2. – С. 60–78.
19. Air–sea interaction under low and moderate winds in the Black Sea coastal zone / I. Repina, A. Artamonov, **A. Chukharev**, I. Esau, Yu. Goryachkin, A. Kuzmin, M. Pospelov, I. Sadovsky, M. Smirnov // Estonian J. of Engineering. – 2012. – Vol. 18, № 2. – P. 89–101.
20. Modeling Vertical Exchange of Heat, Salt, and Other Dissolved Substances in the Cariaco Basin / Samodurov, A.S., Scranton, M.I., Astor, Y., Ivanov, L.I., **Chukharev, A.M.**, Belokopytov, V.N., Globina, L.V. // Deep-Sea Research, 2013. V. 71. № 1. P. 61–72.
21. Пат. 102129 Украина / Измерительная система для исследования мелкомасштабной турбулентности в приповерхностном слое моря / В.А. Барабаш, А.С. Самодуров, **А.М. Чухарев**, заявитель и патентообладатель Морской гидрофиз. ин-т НАН Украины – № а 2011 08409 ; заявл. 04.07.2011 ; опубл. 10.06.2013 ; Бюлл. № 11.
22. **Чухарев А.М.** Модель турбулентности со многими временными масштабами для приповерхностного слоя моря / А.М. Чухарев // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49. – № 4. С. 477 – 488.
23. Интенсификация внутренних волн в зоне сопряжения шельфа и континентального склона как фактор интенсификации вертикального обмена / Самодуров А.С., **Чухарев А.М.**, Носова А.В., Глобина Л.В. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2013. Т.6, № 2. С. 12 – 24.

АННОТАЦИЯ

Чухарев А.М. Вклад основных механизмов генерации турбулентности в вертикальный обмен в деятельном слое моря. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика. – Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь, 2014.

Диссертация посвящена исследованию физических механизмов, определяющих интенсивность вертикального турбулентного обмена в верхних слоях моря. При участии автора разработана и внедрена оригинальная измерительная система, основным элементом которой – многофункциональный комплекс, позволяющий проводить измерения средних и пульсационных гидрофизических характеристик с хорошим разрешением и с высокой точностью. Разработаны и используются две модификации комплекса: зондирующий и позиционный, которые применяются соответственно для исследования процессов в верхнем слое (10 – 100 м) с борта НИС и в приповерхностном (0 – 20 м) с неподвижной платформы. Высокое качество получаемых данных и эффективность использования комплекса подтверждены разносторонними лабораторными испытаниями и эксплуатацией в натурных условиях.

Для описания турбулентного обмена в приповерхностном слое разработаны модели, применимые в различных гидрометеорологических условиях. Многомасштабная модель учитывает различия в масштабах турбулентных вихрей, генерируемых разными механизмами. В качестве основных источников турбулентной энергии рассматриваются сдвиг скорости дрейфового течения, поверхностные волны и их обрушения. Энергетический спектр разделяется по масштабам на участки, системы уравнений для каждого диапазона волновых чисел решаются совместно численным методом. Результаты моделирования сопоставляются с экспериментальными данными и с другими известными на сегодняшний день моделями, показаны преимущества предложенной модели, особенно проявляющиеся в штормовых условиях. Установлена корреляционная зависимость модельных констант от определяющих параметров.

По экспериментальным данным исследованы нестационарные турбулентные процессы в сопряженных слоях моря и атмосферы. Выявлены значимые субмезомасштабные периодичности в этих слоях, связанные, по всей видимости, с когерентными структурами. Разработана нестационарная модель турбулентного обмена для приповерхностного слоя, которая хорошо соответствует экспериментальным данным и правильно описывает фазовые сдвиги и изменчивость по глубине гидрофизических параметров. Показано заметное влияние нестационарности воздействий на интенсивность турбулентного обмена.

Экспериментальными исследованиями в зонах сопряжения шельфа и континентального склона Черного моря установлено, что интенсивность турбулентного обмена в этих районах существенно выше, чем в открытых частях моря при аналогичных условиях стратификации. Скорректированы полученные ранее эмпирические зависимости коэффициента вертикальной турбулентной диффузии и скорости диссипации турбулентной энергии от частоты Вайселя-Брента, что позволяет существенно уточнить параметризацию турбулентного обмена для периферийных районов Черного моря, где имеется значительный перепад глубин. Статистическая модель локализованных турбулентных пульсаций в стратифицированном слое в поле внутренних волн подтверждает объективность оценки масштабов турбулентных пятен по минимуму спектра градиентов.

Ключевые слова: турбулентность, измерительный комплекс, диссипация турбулентной энергии, взаимодействие моря и атмосферы, вертикальный обмен, механизмы генерации турбулентности, внутренние волны.

ABSTRACT

Chukharev A.M. Contributions of the main mechanisms of turbulence generation to vertical exchange in active layer of the sea. – Manuscript.

The thesis is to claim of an academic degree of the Doctor of Physical and Mathematical Sciences in the specialty 04.00.22 – geophysics. – Marine Hydrophysical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Sevastopol, 2014.

The thesis is devoted to research of the physical mechanisms that determine the intensity of a vertical turbulent exchange in the top layers of the sea. With the assistance of the author the original measuring system, which basic element – the multipurpose complex allowing taking measurements of averages and the pulsation hydrophysical characteristics with the good permission and with high precision is developed and introduced. Two modifications of a complex are developed and are used: probing and position which are applied respectively to research of processes in the top layer (10 – 100 m) from a board of R/V and in near-surface (0 – 20 m) from a stationary platform. High quality of the obtained data and efficiency of use of a complex are confirmed with versatile laboratory researches and operation in natural conditions.

The models applicable in various hydrometeorological conditions are developed for the description of a turbulent exchange in a near-surface layer. The multi-scale model considers distinctions in scales of the turbulent whirls generated by different mechanisms. The all main sources of turbulent energy namely the shear of drift current, surface waves and their breakings are considered. The turbulent power spectrum is divided into ranges with respect to the scales. The equation system for each range is solved numerically. The modeling results are compared with the experimental data and with other currently known models. The advantages of the suggested approach are demonstrated. Correlation dependence of model constants on the determining parameters is established.

On experimental data non-stationary turbulent processes in the conjugated layers of the sea and the atmosphere are investigated. Significant submesoscale periodicities in these layers are revealed. These periodicities connected most likely, with coherent structures. The non-stationary model of a turbulent exchange is developed for a near-surface layer. This model well corresponds to experimental data and correctly describes phase displacements and variability of hydrophysical parameters on depth. Noticeable influence variability of impacts on intensity of a turbulent exchange is shown.

By experimental studies in conjugate zones of the shelf and a continental slope of the Black Sea it is established that intensity of a turbulent exchange in these areas is significantly higher, than in open parts of the sea under similar conditions of stratification. The received earlier empirical dependences of vertical turbulent diffusion coefficient and rate of dissipation of turbulent energy on Brunt-Väisälä frequency are corrected. This allows specifying significantly parameterization of a turbulent exchange for the peripheral regions of the Black Sea where there is a considerable difference of depths. The statistical model of the localized turbulent pulsations in the stratified layer in the field of internal waves is developed. It confirms objectivity of an assessment of scales of turbulent patches on a minimum of gradients spectrum.

Keywords: turbulence, measuring complex, dissipation of turbulent energy, air-sea interaction, vertical exchange, mechanisms of turbulence generation, internal waves.