

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Морской гидрофизический институт РАН»  
(ФГБУН ФИЦ МГИ)



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ТУРБУЛЕНТНЫЙ ОБМЕН В ОКЕАНЕ**

Специальность  
**1.6.17. Океанология**

Форма обучения  
**Очная**

г. Севастополь 2024

Рабочая программа дисциплины «Турбулентность и турбулентный обмен в океане» составлена в соответствии с Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов, утвержденными приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 951.

Разработчик рабочей программы дисциплины:

Чухарев Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор отдела аспирантуры ФГБУН ФИЦ МГИ.

(Ф.И.О., ученая степень, звание, должность разработчиков).



(Подпись)

Зам. директора по научно-методической и образовательной работе

Васильев Ф.И.О. д-р геогр. наук Васильева Е.Ф.  
(Подпись)

## 1. ЦЕЛЬ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины является формирование цельного представления о роли и механизмах турбулентного перемешивания в океане.

## 2. ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

**Задачи освоения дисциплины:**

- изучение физических механизмов и процессов, определяющих турбулентный режим;
- изучение основных физико-математических принципов и подходов для описания турбулентности;
- изучение моделей турбулентности, условий их применимости;
- формирование умений и навыков применения законов и моделей турбулентности при решении научно-исследовательских и практических задач в океанологии.

## 3. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ

3.1. Дисциплина «Турбулентность и турбулентный обмен в океане» относится к Образовательному компоненту «Дисциплины (модули)» программы аспирантуры по специальности 1.6.17. Океанология.

3.2. Данная дисциплина находится в тесной взаимосвязи с общей океанологией, волновыми движениями в океане, термодинамикой океана, общей циркуляцией океана, взаимодействием атмосферы и океана, акустикой.

## 4. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Данная дисциплина формирует частично следующие ОК и ПК:

- повышает общеобразовательный уровень;
- пополняет систематические представления о современном состоянии науки в области океанологии;
- дает новые знания о теоретических и экспериментальных методах исследования океанических процессов;
- развивает умения ставить задачи, находить алгоритмы решения и формулировать физически обоснованные выводы.

4.2. Аспирант по дисциплине «Турбулентность и турбулентный обмен в океане» должен знать:

- о роли турбулентности в перемешивании вод океана;
- о влиянии турбулентности на обмен импульсом, энергией и веществом в различных слоях океана и при взаимодействии океана и атмосферы;
- основные физические законы и процессы, определяющие характер турбулентности;
- основные принципы и подходы математического описания турбулентности;
- базовые и современные модели для описания турбулентных течений, условия их применимости и ограничения;
- новые и перспективные направления в исследовании турбулентности.

**уметь:**

- применять полученные знания для постановки и решения научно-исследовательских и практических задач океанологии;
- использовать адекватные методы и соответствующий математический аппарат для описания турбулентного обмена;
- проводить анализ результатов и формулировать объективные физические выводы.

**владеть:**

- методами выявления доминирующих физических механизмов, определяющих турбулентный режим в исследуемой области океана;
- методами анализа явлений турбулентности в океане, постановки задач и определения граничных условий;
- математическими методами решения сформулированных задач;
- навыками компьютерных вычислений и программирования при решении задач турбулентного обмена в океане.

Таблица1. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Код и уровень формируемой компетенции по ООП ВО	Владения	Умения	Знания
(ПК-1)-1			цельные представления о роли турбулентности в океанологических процессах
(ПК-2)-1	методами анализа океанологических процессов, выделения основных механизмов формирования океанологических полей;	определять влияние турбулентности на исследуемые океанологические процессы;	физико-математические принципы описания турбулентности
(ПК-2)-2	методами выявления доминирующих физических механизмов, определяющих турбулентный режим в исследуемой области океана.	использовать адекватные физико-математические подходы и методы для описания турбулентного обмена.	механизмы влияния турбулентности на обмен импульсом, энергией и веществом в различных слоях океана и при взаимодействии океана и атмосферы
(ПК-3)-1	математическими методами решения сформулированных задач;	проводить анализ результатов и формулировать объективные физические выводы.	Базовые и современные модели для описания турбулентных течений, условия их применимости и ограничения
(ПК-4)-1	навыками компьютерных вычислений и программирования при решении задач турбулентного обмена в океане.	уметь пользоваться пакетами прикладных программ	знать современные пакеты прикладных программ, применяемых при решении задач турбулентного обмена в океане

## 5. ОБЪЕМ И ВИД УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Общая трудоёмкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы (108 часов).

Таблица 2. Распределение трудоемкости по всем видам аудиторной и самостоятельной работы аспиранта по семестрам:

Виды учебной работы	Трудоемкость (часы)	
	Часы	ЗЕ
Аудиторные занятия (всего), в том числе:	46	1,2
Лекции	32	1
Практические занятия	8	0,2
Самостоятельная работа (всего)	66	1,8
Формы аттестации по дисциплине зачет с оценкой	2	0,05
<b>Общая трудоемкость</b>	<b>108</b>	<b>3</b>

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### **Раздел 1. Основы теории турбулентности**

Тема 1. молекулярное и турбулентное перемешивание. Определение турбулентности. Закон подобия и число Рейнольдса. Ламинарность и переход к турбулентности. Критическое число Рейнольдса.

Тема 2. Средние и пульсационные компоненты гидродинамических величин. Методы осреднения. Эргодичность. Турбулентные напряжения.

Тема 3. Моменты гидродинамических полей. Случайные поля. Эргодическая теорема.

### **Раздел 2. Методы расчета турбулентных течений**

Тема 4. Уравнения Рейнольдса. проблемы замыкания. Течение около стенки и логарифмический пограничный слой.

Тема 5. Полуэмпирические теории турбулентности. Турбулентные модели первого приближения (градиентные).

Тема 6. Уравнение баланса турбулентной энергии. коэффициенты турбулентной вязкости и теплопроводности. скорость диссипации турбулентной энергии. Модели второго приближения (дифференциальные).

Тема 7. Локально-изотропная турбулентность. гипотезы подобия Колмогорова. теория спектра турбулентности. Инерционный интервал. передача энергии по спектру. «Закон пяти третей» Монина-Обухова. Турбулентная диффузия.

Тема 8. Современные направления развития моделей турбулентности. Численное моделирование.

### **Раздел 3. Океанская турбулентность**

Тема 9. Типы и масштабы океанских движений. механизмы генерации турбулентности в океане. турбулентность в стратифицированных слоях. критерий Ричардсона. двойная диффузия.

Тема 10. Мелкомасштабная турбулентность. методы определения коэффициентов турбулентного обмена и скорости диссипации.

Тема 11. Крупномасштабная горизонтальная турбулентность. Турбулентность в приповерхностном и придонном слоях.

Тема 12. Аппаратура и экспериментальные исследования турбулентности в океане. Задачи по исследованию турбулентного обмена в океане на современном этапе.

## 7. СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Таблица 3. Лекции, их содержание и объем в часах

Наименование разделов и тем	Объем работы (в часах)	Всего учебных занятий (в часах)			
		Лекции	Семинары	Самостоятельная работа	Зачет
1	2	3	4	5	6
<b>Раздел I. Основы теории турбулентности</b>	<b>20</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>12</b>	
Тема 1. Молекулярное и турбулентное перемешивание. Определение турбулентности. Закон подобия и число Рейнольдса. Ламинарность и переход к турбулентности. Критическое число Рейнольдса.		2		2	
Тема 2. Средние и пульсационные компоненты гидродинамических величин. Методы осреднения. Эргодичность. Турбулентные напряжения.		2		2	
Тема 3. Моменты гидродинамических полей. Случайные поля. Эргодическая теорема.		2		4	
Изучение дополнительной литературы. Рефераты. Обобщающий семинар по разделу.			2	4	
<b>Раздел 2. Методы расчета турбулентных течений</b>	<b>42</b>	<b>12</b>	<b>2</b>	<b>28</b>	
Тема 4. Уравнения Рейнольдса. Проблемы замыкания. Течение около стенки и логарифмический пограничный слой.		2		2	
Тема 5. Полуэмпирические теории турбулентности. Турбулентные модели первого приближения (градиентные).		2		4	
Тема 6. Уравнение баланса турбулентной энергии. Коэффициенты турбулентной вязкости и теплопроводности. Скорость диссиpации турбулентной энергии. Модели второго приближения (дифференциальные).		2		6	
Тема 7. Локально-изотропная турбулентность. Гипотезы подобия Колмогорова. Теория спектра турбулентности. Инерционный интервал. Передача энергии по спектру. «Закон пяти третьей» Монина-Обухова. Турбулентная диффузия.		4		6	
Тема 8. Современные направления развития моделей турбулентности. Численное моделирование.		2		6	
Самостоятельное изучение рекомендованной литературы. Рефераты. Обобщающий семинар по разделу.			2	4	
<b>Раздел 3. Океанская турбулентность</b>	<b>44</b>	<b>14</b>	<b>4</b>	<b>26</b>	
Тема 9. Типы и масштабы океанских движений. Механизмы генерации турбулентности в океане. Турбулентность в стратифицированных слоях. Критерий Ричардсона. Двойная диффузия.		4		6	
Тема 10. Мелкомасштабная турбулентность. Методы определения коэффициентов турбулентного обмена и скорости диссиpации.		2		4	
Тема 11. Крупномасштабная горизонтальная турбулентность. Турбулентность в приповерхностном и придонном слоях.		4		6	
Тема 12. Аппаратура и экспериментальные исследования турбулентности в океане. Задачи по исследованию турбулентного обмена в океане на современном этапе.		4		4	
Самостоятельное изучение рекомендованной литературы и научных статей. Обобщающий семинар по разделу.			4	6	
<b>Зачет</b>					<b>2</b>
<b>ИТОГО</b>	<b>108</b>	<b>32</b>	<b>8</b>	<b>60</b>	<b>2</b>

Таблица 4. Содержание семинарских занятий по дисциплине «Турбулентность и турбулентный обмен в океане»:

№ занятия	№ темы	Краткое содержание занятия	Кол-во часов
1	1	Основы теории турбулентности	2
2	2	Методы расчета турбулентных течений	2
3	3	Океанская турбулентность в стратифицированных слоях	2
4	3	Турбулентность в пограничных слоях океана. Турбулентная диффузия.	2
<b>Всего</b>			<b>8</b>

## 8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ОСВОЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Основными методами (технологиями) обучения дисциплины являются проблемное обучение, коммуникативные технологии и индивидуальные задания, выполняемые при решении задач на предложенную тему. Индивидуальные задания, выполняемые аспирантами самостоятельно, являются одним из методов активизации процесса обучения по дисциплине.

Работа в аудитории предусматривает:

- лекции;
- консультации, в том числе консультации для групп и индивидуальные консультации.
- интерактивные семинары для проверки усвоения каждого раздела.

Основной формой овладения аспирантами учебного материала является их самостоятельная работа в свободное от обязательных учебных занятий время (во внеаудиторное время) под руководством преподавателя.

## 9. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

### 9.1. Текущий контроль

Текущий контроль успеваемости, т. е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляется на протяжении семестра. Текущая самостоятельная работа студента направлена на углубление и закрепление знаний, и развитие практических умений аспиранта.

Текущая аттестация проводится в виде тестов, опросов и решения задач на семинарах, участия в дискуссиях и обсуждениях проблемных вопросов.

### 9.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация осуществляется в конце семестра и завершает изучение дисциплины «Турбулентность и турбулентный обмен в океане». Форма аттестации – дифференцированный зачет в устной или письменной форме. Знания, полученные при изучении дисциплины, также будут использоваться при подготовке к кандидатскому экзамену.

### 9.3. Список тем для промежуточной аттестации. Список вопросов приведен в Приложении 1.

- ламинарное и турбулентное течение, числа Рейнольдса.
- уравнения Рейнольдса, логарифмический пограничный слой.
- полуэмпирические теории турбулентности. Модели Прандтля и Кармана.
- уравнение баланса турбулентной энергии. Дифференциальные модели турбулентности.
- локально-изотропная турбулентность. Гипотезы подобия Колмогорова. Спектральные модели турбулентности.

- типы и масштабы океанских движений. Механизмы генерации турбулентности в океане.
- турбулентность в стратифицированных слоях. Число Ричардсона. Двойная диффузия.
- методы определения коэффициентов турбулентного обмена и скорости диссипации.

- крупномасштабная горизонтальная турбулентность. Турбулентная диффузия.
- особенности турбулентности в приповерхностном и придонном слоях океана.
- аппаратура и методы, применяемые для экспериментальных исследований турбулентности в океане.
- направления современных исследований турбулентного обмена в океане.

Таблица 6. Оценивание аспиранта на промежуточной аттестации в форме дифференцированного зачета по дисциплине «Турбулентность и турбулентный обмен в океане»:

<b>Оценка по национальной шкале</b>		<b>Требования к знаниям и критерии выставления оценок</b>
<b>Для зачета с оценкой</b>	<b>для зачета</b>	
<i>Зачтено</i>	<i>отлично</i>	Аспирант при ответе демонстрирует полноценное знание содержания тем учебной дисциплины, уверенно владеет терминологией и основными понятиями, знает условия возникновения турбулентности и методы ее описания, имеет представление об особенностях турбулентных течений, о специфике океанской турбулентности. Способен делать анализ проблем и намечать пути их решения применительно к океанологическим задачам с учетом гидрометеорологической ситуации и режима турбулентного обмена.
	<i>хорошо</i>	Аспирант знает основное содержание учебной дисциплины, имеет достаточное представление о физических процессах в турбулентном течении и методах их описания. Ориентируется в подходах к теоретическому описанию турбулентности с помощью различных моделей. Понимает основные особенности океанской турбулентности, знает направления решения океанологических задач.
	<i>удовлетворительно</i>	Аспирант в целом представляет содержание учебного курса, демонстрирует правильное понимание физических процессов и явлений в океанологии, знает основные термины и понятия в теории турбулентности.
<i>Не засчитано</i>	<i>неудовлетворительно</i>	Аспирант при ответе демонстрирует слабое знание значительной части основного материала в области океанской турбулентности. Не информирован или слабо разбирается в проблемах, и/или не в состоянии наметить пути их решения. Не владеет терминологией и не знает базовых результатов теории турбулентности.

## 10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Таблица 7. Основная и дополнительная литература

	Наименование и полное библиографическое описание	Количество экземпляров в библиотеке
<b>Основная литература</b>		
1	Монин А.С., Озмидов Р.В. Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеоиздат, 1981.- 321 с.	4 экз.

2	Монин А.С. Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч 1. М.: Наука, 1965. - 639 с.	4 экз. + эл.кн.
3	Озмидов Р.В. Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане. М.: Наука, 1968. – 320 с.	4 экз.
4	Тэрнер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977. – 431 с.	1 экз.
5	Мамаев О.И. Физическая океанография. Избранные труды. М.: ВНИРО, 2000. – 364 с.	2 экз.
6	Носов М.А. Введение в теорию турбулентности. – М.: Янус-К, 2004.	
7	Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. – Москва-Ижевск: НИЦ "РХД", 2003.	

#### Дополнительная литература

1	Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана. / Отв. ред. В.М. Каменкович, А.С. Монин. – М.: Наука, 1978. – 455 с.	2 экз. + эл.кн.
2	Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 319 с.	5 экз.
3	Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 277 с.	1 экз.
4	Китайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 284 с.	3 экз.
5	Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 375 с.	4 экз.
6	Методы расчета турбулентных течений: Пер с англ. / Под ред. В. Колльмана. – М.: Мир, 1984. – 464 с.	1 экз.

#### Периодические издания

1	Морской гидрофизический журнал.	5 экз.
2	Океанология.	2 экз.
3	Известия РАН. Физика атмосферы и океана.	2 экз.
4	Метеорология и гидрология.	2 экз.
5	Journal of Physical Oceanography.	1 экз. + эл.кн.
6	Journal of Geophysical Research.	1 экз.
7	Deep-Sea Research.	1 экз.

Программное обеспечение:

- Microsoft Office;
- Matlab.

#### 11. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Освоение дисциплины предполагает использование учебной аудитории для проведения лекционных занятий с необходимыми техническими средствами (компьютер, проектор, экран).

к зачету по курсу «Турбулентность и турбулентный обмен в океане»

### ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

1. Молекулярное и турбулентное перемешивание. Определение турбулентности. Закон подобия и число Рейнольдса. Ламинарность и переход к турбулентности.
2. Критическое число Рейнольдса. Средние и пульсационные компоненты гидродинамических величин.
3. Методы осреднения. Теоретико-вероятностный метод осреднения.
4. Турбулентные напряжения. Моменты гидродинамических полей.
5. Случайные поля. Эргодическая теорема. Детерминированные и недетерминированные процессы. Тренды.
6. Спектры случайных процессов. Амплитудный и энергетический спектр. Частотный и пространственный спектр.

### МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

7. Правила осреднения Рейнольдса. Уравнения Рейнольдса. Проблемы замыкания.
8. Течение около стенки и логарифмический пограничный слой.
9. Полуэмпирические теории турбулентности. Турбулентные модели первого приближения (градиентные). Модель Буссинеска. Коэффициенты турбулентной вязкости и теплопроводности.
10. Модель Прандтля.
11. Вихрь в гидродинамике. Модель Тэйлора.
12. Модель Кармана.
13. Уравнение баланса турбулентной энергии.
14. Скорость диссипации турбулентной энергии.
15. Модели второго приближения (дифференциальные). Уравнение переноса напряжений Рейнольдса.
16. Модель Колмогорова-Прандтля.
17. Модель Лаундера ( $k - \varepsilon$ -модель), Ханжалика – Лаундера.
18. Статистическое описание турбулентности. Эргодичность. Локально-изотропная турбулентность.
19. Гипотезы подобия Колмогорова. Теория спектра турбулентности. Передача энергии по спектру. Иерархия вихрей.
20. Инерционный и диссипативный участки спектра турбулентности. «Закон пяти третей» Монина-Обухова.
21. Современные направления развития моделей турбулентности. Численное моделирование.

### ОКЕАНСКАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

22. Типы и масштабы океанских движений. Механизмы генерации турбулентности в океане.
23. Турбулентность в стратифицированных слоях. Уравнение баланса турбулентной энергии в форме Ричардсона. Критерий Ричардсона. Масштаб Озмидова.
24. Турбулентность в приповерхностном и придонном слоях.
25. Сравнительная характеристика коэффициентов вертикального и горизонтального перемешивания в море. Зависимость коэффициента горизонтального обмена от масштаба. "Закон четырех третей" Ричардсона — Обухова.
26. Задача о вертикальном обмене трех водных масс.
27. Задача о тепловых волнах в море.

28. «Двойная» диффузия.
29. Мелкомасштабная турбулентность. Скорость диссипации.
30. Условия для развития конвекции. Число Рэлея.
31. Виды конвекции в море. Глубина конвективного перемешивания.
32. Аппаратура и экспериментальные исследования турбулентности в океане. Задачи по исследованию турбулентного обмена в океане на современном этапе.