

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

УТВЕРЖДАЮ

директор ФГБУН ФИЦ МГИ


С. К. Коновалов

«29»  2026 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ТУРБУЛЕНТНЫЙ ОБМЕН В ОКЕАНЕ

Специальность
1.6.17. Океанология

Форма обучения
Очная

г. Севастополь 2026

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:

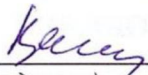
Чухарев Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, доцент отдела аспирантуры
ФГБУН ФИЦ МГИ

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



(Подпись)

Зам. директора по научно-методической и образовательной работе, доктор географических наук



(Подпись)

Васечкина Е. Ф.

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.

Таблица 1. 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 трудоёмкости по всем видам аудиторной и самостоятельной работы аспиранта по семестрам:

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

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
Раздел I. Основы теории турбулентности	20	6	2	12	
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	
Раздел 2. Методы расчета турбулентных течений	42	12	2	28	
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 диссипации 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 третей» 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	
Раздел 3. Океанская турбулентность	44	14	4	26	
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 диссипации.		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	
Зачет					2
ИТОГО	108	32	8	60	2

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
Всего			8

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 осуществляемая 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»:

Оценка по национальной шкале		Требования к знаниям и критерии выставления оценок
Для зачета с оценкой	для зачета	
Зачтено	<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.
Не зачтено	<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
	Основная литература	
1	Монин А.С., Озмидов Р.В. Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеиздат, 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.: Гидрометеиздат, 1980. – 319 с.	5 экз.
3	Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 277 с.	1 экз.
4	Китайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 284 с.	3 экз.
5	Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. – Л.: Гидрометеиздат, 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).

ВОПРОСЫ

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 ($k - \epsilon$ -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» Монины-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.