

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
филиал МГУ в г. Севастополе  
факультет естественных наук  
кафедра физики и геофизики

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Филиала МГУ в г. Севастополе

О.А. Шпырко

20\_\_ г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**Наименование дисциплины (модуля):**

**Волны в океане**

*код и наименование дисциплины (модуля)*

**Уровень высшего образования:**

*специалитет*

**Направление подготовки:**

**03.05.02 Фундаментальная и прикладная физика**

*(код и название направления/специальности)*

**Направленность (профиль) ОПОП:**

**общий**

*(если дисциплина (модуль) относится к вариативной части программы)*

**Форма обучения:**

**очная**

*очная, очно-заочная*

Рабочая программа рассмотрена  
на заседании кафедры физики и геофизики  
протокол №4 от «21» июня 2023 г.  
Заведующий кафедрой

(К.В. Показеев)

(подпись)

Рабочая программа одобрена  
Методическим советом  
Филиала МГУ в г. Севастополе  
Протокол №6 от «28» июня 2023 г.

(Л.И. Теплова)

(подпись)

Севастополь, 2023

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.05.02 «Фундаментальная и прикладная физика» в редакции приказа МГУ №1780 от 29 декабря 2018 г.

Год (годы) приема на обучение: с 2020

*курс – 4*

*семестры – 8*

*зачетных единиц – 3*

*академических часов – 51, в т.ч.*

*лекций – 17 часа*

*практических занятий – 34*

*Форма промежуточной аттестации:*

*зачет в 8 семестре*

## **1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО.**

Курс «Волны в океане» является профильной дисциплиной в профессиональной подготовке выпускника для последующей работы в области Морской гидрофизики. Он знакомит студентов с одним из основных разделов классической Океанологии, который в значительной мере связан с классической Общей физикой, в особенности ее разделом «Оптика», и который опирается на методы Теоретической физики, в особенности ее раздела «Гидродинамика». Курс излагается на начальном этапе изучения океанологических дисциплин и его главной задачей является создание фундаментальной базы знаний, на основе которой в дальнейшем можно развивать более углубленное и детализированное изучение всех разделов Морской гидрофизики в рамках специализированных курсов.

Данная программа строится на преемственности программ в системе высшего образования и предназначена для студентов, усвоивших следующие дисциплины программы подготовки бакалавров: «Математический анализ», «Аналитическая геометрия», «Дифференциальные уравнения», «Механика», «Молекулярная физика и термодинамика», «Оптика», «Теоретическая механика», «Методы математической физики», а также начальные разделы курсов «Электродинамика» и «Механика сплошных сред».

Дисциплина предполагает наличие у обучающихся навыков самостоятельной работы с учебной литературой.

Дисциплина «Волны в океане» является базовой последующего усвоения дисциплин «Теория турбулентности», «Методы и средства измерений в океане» и «Введение в физику атмосферы», а также для подготовки выпускной квалификационной работы в области морской гидрофизики.

## **2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (если есть).**

Успешное освоение дисциплин модулей «Математика», «Общая физика» и «Теоретическая физика».

## **3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.**

Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю):

Знать:

- Общую часть (понятия волновой механики, уравнения гидродинамики и основные типы волн);
- Акустические волны (включая явление подводного звукового канала и приложения подводной акустики);
- Длинные волны (включая цунами, сейши, колебания в заливах и гаванях);
- Приливы (включая статическую теорию, уравнения Лапласа, волны Кельвина);
- Поверхностные волны (включая гравитационно-капиллярные волны, корабельные волны, представления о развитии ветровых волн)
- Внутренние волны (включая случаи двухслойной и непрерывно-стратифицированной жидкости, короткие внутренние волны и колебания, связанные с вращением Земли);
- Планетарные волны (включая волны Россби и топографические волны).

Уметь:

- математически описывать физические свойства основных типов волн (дисперсионное соотношение, связь орбитальных скоростей с давлением и смещениями частиц воды, траектории частиц).

Владеть:

- представлениями о подходах к измерениям и исследованиям океанических волновых процессов, а также иметь представления о роли и значении рассматриваемых явлений в динамике океана и в жизнедеятельности человека.

Иметь опыт:

- математического описания длинных волн в аспекте динамики океана.

#### 4. Формат обучения – контактный.

5. Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., в том числе 34 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (аудиторная нагрузка), 38 академических часов на самостоятельную работу обучающихся.

6. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий.

6.1. Структура дисциплины (модуля) по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий.

Наименование разделов и тем дисциплины (модуля),  Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Номинальные трудозатраты обучающегося		Всего академических часов	Форма текущего контроля успеваемости (наименование)	
	Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем)  Виды контактной работы, академические часы				Самостоятельная работа обучающегося, академические часы
	Занятия лекционного типа*	Занятия семинарского типа*			
Введение (общие положения волновой механики; дисперсионное соотношение; принцип суперпозиции; орбитальные скорости и фазовая скорость; уравнения гидродинамики; силы, ответ-	Консультации, 3	-	3	6	-

ственные за различные типы волн и колебаний).					
Акустические волны.	Консультации, 3	-	3	6	-
Длинные волны (теория, сейши, колебания в бухтах, цунами).	Консультации, 4	-	4	8	-
Приливы (основные понятия, статическая теория, динамическая теория).	Консультации, 3	-	3	6	Контрольная работа
Поверхностные волны (теория для глубокой воды, групповая скорость, гравитационно-капиллярные волны, стационарные и корабельные волны, конечная глубина).	Консультации, 4	-	3	7	-
Рефракция волн.	Консультации, 4	-	3	7	-
Ветровые волны (роль, характеристики, спектры, основы прогноза).	Консультации, 3	-	3	6	-
Внутренние волны (общие понятия, двухслойная жидкость, непрерывно стратифицированная жидкость, мелкомасштабные внутренние волны).	Консультации, 4	-	4	8	-
Волны и колебания, обусловленные вращением Земли.	Консультации, 3	-	3	6	Контрольная работа
Планетарные волны.	Консультации, 3	-	3	6	-

Другие виды самостоятельной работы (при наличии): например, курсовая работа, творческая работа (эссе)	-	-	-	-	-
	34	-	32	66	
Промежуточная аттестация (зачет)			6	6	
<b>Итого</b>				72	

## 6.2. Содержание разделов (тем) дисциплины.

№ п/п	Наименование разделов (тем) дисциплины	Содержание разделов (тем) дисциплин
1.	Тема 1.	Уравнения гидродинамики. Силы, ответственные за различные типы волн и колебаний: поверхностные волны, внутренние волны, инерционные колебания и волны, приливы, планетарные волны. Уравнения гидродинамики – оценка членов. Устойчивое равновесное состояние и малые возмущения; линеаризация уравнений и решения в виде волн; дисперсионное соотношение; принцип суперпозиции; орбитальные скорости и фазовая скорость.
2.	Тема 2.	Уравнения гидродинамики, адиабатическое приближение, звуковые уравнения, дисперсионное соотношение, скорость звука, орбитальные скорости. Энергия и поток энергии. Проверка малости возмущений.
3.	Тема 3.	Теория мелкой воды – уравнения и граничные условия, приближение гидростатики, уравнение длинных волн, волновое уравнение и его общее решение, фазовая скорость, движение частиц воды; энергия волн и групповая скорость. Сейши – резонансные колебания в прямоугольном бассейне с ровным дном: постановка задачи, решение в виде стоячих волн, дискретные моды колебаний; картины движения жидкости и изменений уровня для различных мод в случаях закрытого бассейна и бассейна, открытого с одного конца; понятие о сейшах в реальных водое-

		<p>мах, периоды и пространственная структура; колебания в бухтах, резонатор Гельмгольца, тягун.</p> <p>Цунами – механизмы генерации, скорость распространения и высота волн; трансформация волн при приближении к берегу – объяснение рефракции и интенсификации волн на качественном уровне, зависимость высоты волн от глубины в линейном приближении.</p>
4.	Тема 4.	<p>Основные характеристики приливов – периоды, элементы прилива и их характерные значения, приливные неравенства и их связь с фазами луны.</p> <p>Статическая теория приливов – приливообразующие силы, эллипсоид прилива, объяснение изменчивости характеристик приливов и фазового неравенства с помощью статической теории приливов.</p> <p>Динамическая теория приливов – приливные уравнения Лапласа, индуцированные и собственные приливы, волны Кельвина в зональном канале: дисперсионное соотношение и свойства, радиус деформации Россби; предвычисление приливов – измерения приливных колебаний, гармонический анализ приливов, понятие о моделировании приливов.</p>
5.	Тема 5.	<p>Поверхностные волны на глубокой воде - постановка задачи: уравнения, динамические и кинематические граничные условия; невозмущенное состояние и линеаризация; дисперсионное соотношение, связь возвышений поверхности, скоростей и давления; траектории частиц в бегущей волне; энергия и поток энергии.</p> <p>Групповая скорость - задача Коши, решение методом Фурье, формула для вектора групповой скорости.</p> <p>Гравитационно-капиллярные волны – отличия в постановке задачи от случая чисто гравитационных волн, дисперсионное соотношение, фазовая и групповая скорости; предельные случаи чисто капиллярных и чисто гравитационных волн. Дисперсионная кривая <math>\omega(k)</math> – определение фазовой и групповой скоростей по дисперсионной кривой, диаграммы Хофмюллера.</p> <p>Стационарные волны. Стационарные</p>

		<p>волны на потоке. Корабельные волны. Паразитная капиллярная рябь.</p> <p>Поверхностные волны при конечной глубине - дисперсионное соотношение, траектории частиц в бегущей волне, случаи мелкой и глубокой воды: фазовая и групповая скорости, вертикальная структура течений, движение частиц; стоячие волны, траектории частиц в стоячей волне.</p>
6.	Тема 6.	<p>Приближение геометрической оптики – волновые пакеты, гамильтонова система, лучи, каустики, подводный звуковой канал. Рефракция поверхностных волн на мелководье и на течениях. Пространственная и временная фокусировка.</p>
7.	Тема 7.	<p>Понятие о ветровых волнах и их роли в системе океан-атмосфера – диапазон горизонтальных масштабов ветровых волн; ветровое волнение и зыбь; явления, связанные с ветровыми волнами: сопротивление воздушному потоку, обрушения волн, генерация аэрозолей, генерация подповерхностной турбулентности, влияние на процессы обмена между атмосферой и океаном, слики, сулои, волны-убийцы.</p> <p>Характеристики ветровых волн – методы измерений, волнограммы; элементы ветровых волн – высота и период индивидуальных волн, значительные волны, характеристики <math>H_s</math> и <math>T_s</math>; плотность вероятности возвышений, гауссово волнение, понятие о волнах-убийцах; спектры волн – понятия о частотном, частотно-угловом и пространственном спектрах волн; решетки датчиков, дистанционные измерения – скаттерометр, альтиметр, радиолокатор с синтезированием апертуры, уклоны волн и солнечный блик.</p> <p>Основы прогноза ветрового волнения - волнообразующие факторы, гипотеза Китайгородского и безразмерные характеристики волнения, развивающиеся и развитые волны, эмпирические законы развития волн, развитие волн на примере зависимости спектра JONSWAP от безразмерного разгона волн, понятие о волновых моделях.</p>
8.	Тема 8.	<p>Общее понятие о внутренних волнах – физический механизм, методы изме-</p>

		<p>рений, характерные масштабы, роль в динамике океана.</p> <p>Внутренние волны в двухслойной жидкости – постановка задачи, невозмущенное состояние и линеаризация, волновые решения, дисперсионное соотношение, внутренняя мода: вертикальные профили горизонтальной и вертикальной скоростей, дивергенции и конвергенции скорости на морской поверхности; приближение твердой крышки.</p> <p>Внутренние волны в непрерывно стратифицированной жидкости – частота Вэйсяля-Брента; постановка задачи, невозмущенное состояние и линеаризация, разделение переменных и уравнение для вертикальной скорости, постановка краевой задачи; волновые моды: дисперсионные соотношения и вертикальная структура.</p> <p>Мелкомасштабные внутренние волны (без учета вращения Земли) – дисперсионное соотношение, движение частиц воды, фазовая и групповая скорости, распространение волн от точечного источника и его объяснение с помощью понятий групповой и фазовой скоростей.</p>
9.	Тема 9.	<p>Гироскопические волны – постановка задачи, движение частиц, дисперсионное соотношение, фазовая и групповая скорости.</p> <p>Квазиинерционные внутренние волны – постановка задачи, невозмущенное состояние и линеаризация, волновое решение, движение частиц, дисперсионное соотношение, фазовая и групповая скорости.</p> <p>Инерционные колебания – постановка задачи, решение для случая скачкообразного усиления ветра.</p> <p>Шельфовые волны Кельвина – постановка задачи, дисперсионное соотношение и свойства, радиус деформации Россби.</p>
10.	Тема 10.	<p>Физическая природа волн Россби в однородной вращающейся жидкости - абсолютная и относительная завихренность, сопротивление возмущениям и столбики Праудмена-Тэйлора, число Россби, физический механизм волны Россби.</p>

		<p>Баротропные волны Россби – постановка задачи, приближение <math>\beta</math>-плоскости, уравнение для функции тока в приближении твердой крышки, движение частиц, дисперсионное соотношение, фазовая и групповая скорости. Отражения от границ.</p> <p>Бароклинные волны Россби – уравнение для завихренности, бароклинный вектор, решение в виде волн в горизонтальной плоскости и разделение переменных, краевая задача для вертикальной структуры волн, радиусы деформации Россби, дисперсионное соотношение.</p> <p>Топографические волны Россби – потенциальная завихренность, физический механизм баротропных топографических волн Россби, дисперсионное соотношение.</p>
--	--	--

## 7. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

### 7.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Система контроля знаний включает устный опрос в течение нескольких минут на каждом занятии и зачет. Результаты опроса служат основой для проставления зачета. Зачет также включает ответы на вопросы преподавателя.

Примеры контрольных вопросов по курсу.

Элементы волн (перечислить и показать для конкретного типа волн).

Направление распространения волн (показать для конкретной волны).

Стоячие и стационарные волны (в чем различие).

Стационарные волны и эффект Доплера (какова связь).

Антенна из 3 датчиков – можно ли определить направление на источник и длину волны.

Связь между характеристиками звуковой волны – скоростью частиц и звуковым давлением.

Законы сохранения для системы лучевых уравнений.

Может ли поверхностная волна отразиться от струи течения?

Привести пример захвата волн течением.

Дать интерпретацию подводному звуковому каналу, используя закон Снеллиуса.

Уравнения теории поверхностных гравитационных волн.

Компоненты скорости, возвышение поверхности и давление в прогрессивной и стоячей поверхностной волне.

Траектории движения жидких частиц в прогрессивной и стоячей поверхностной волне.

Предложить способы различения зыби и ветровых волн.

Объяснить трансформацию поверхностных волн при подходе к берегу.

Что такое возраст ветровых волн?

Как изменяются элементы ветровых волн в зависимости от разгона?

Какие характеристики волн можно извлечь из диаграммы Хофмюллера?

Оценить период основной сейши по известным глубине и размеру водоема.

Объяснить трансформацию элементов цунами при подходе к берегу.

Сколько мод внутренних волн возможно в четырехслойном океане?

Показать фазовый резонанс на диаграмме  $\omega$ - $k$ .

Объяснить угол расхождения системы корабельных волн.

Почему волны на морской поверхности можно наблюдать визуально?

Перечислить геофизические процессы, где существенна роль обрушений ветровых волн.

## **7.2 Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.**

- для зачета

Примеры вопросов зачета.

Распространение звука в океане. Рефракция звуковых волн. Подводный и приповерхностный звуковые каналы. Факторы, влияющие на затухание акустических волн с расстоянием.

Акустические волны. Компоненты скорости и давление в акустической волне в жидкости. Скорость звука, ее связь с характеристиками среды, формулы Ньютона и Лапласа. Зависимость коэффициента поглощения акустического излучения в воде от его частоты.

Типы волн. Классификация волн по возбуждающим силам, характеру движения формы, вертикальной структуре. Основные элементы волн. Волны на глубокой и мелкой воде - упрощающие аппроксимации.

Ветровые волны. Зарождение и развитие, волнообразующие факторы. Средние характеристики, обеспеченность и функции распределения. Спектральное представление ветровых волн.

Внутренние волны. Определение внутренних волн. Условия их существования. Вертикальная структура внутренних волн. Методы обнаружения.

Цунами. Причины возникновения. Скорость распространения. Трансформация элементов цунами при подходе к берегу.

Сейши. Механизм образования сейш. Основные элементы сейшевых колебаний. Периоды сейшевых колебаний. Траектории движения жидких частиц.

Ветровые волны и зыбь. Связь спектра ветровых волн с волнообразующими факторами. Трансформация волн при подходе к берегу.

Уравнения теории поверхностных гравитационных волн. Потенциальность волн. Интеграл Бернулли. Граничные условия.

Теория волн малой амплитуды. Дисперсионное соотношение. Компоненты скорости и давление в прогрессивной и стоячей волне. Траектории движения жидких частиц.

Определения коротких и длинных гравитационных волн. Основные допущения теории длинных волн. Уравнения длинных волн.

Приливы. Основные понятия. Наблюдения приливов. Приливообразующие силы. Потенциал приливообразующей силы.

Статическая теория приливов. Формирование статического прилива. Влияние Солнца на статический прилив. Неравенства статического прилива.

Динамическая теория приливов. Приливные уравнения Лапласа. Гармонические составляющие приливов.

Инерционные (гироскопические) волны. Причина возникновения. Уравнения для волн в однородном жидком слое. Дисперсионное соотношение, групповая скорость.

Уравнение для вертикальной составляющей скорости внутренних волн в стратифицированном океане. Приближения Буссинеска и твердой крышки. Дисперсионные кривые и собственные моды внутренних волн.

Внутренние волны при двухслойной стратификации океана. Дисперсионное соотношение и вертикальная структура собственных мод.

<b>ШКАЛА И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ результатов обучения (РО) по дисциплине (модулю)</b>				
<b>Оценка</b> РО и соответствующие виды оценочных средств	Не зачтено	Зачтено		
<b>Знания</b> (домашние задания)	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Сформированные систематические знания
<b>Умения</b> (контрольные работы)	Отсутствие умений	В целом успешное, но не систематическое умение	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности непринципиального характера)	Успешное и систематическое умение
<b>Навыки</b> (владения, опыт деятельности) (зачет)	Отсутствие навыков (владений, опыта)	Наличие отдельных навыков (наличие фрагментарного опыта)	В целом, сформированные навыки (владения), но используемые не в активной форме	Сформированные навыки (владения), применяемые при решении задач

## 8. Ресурсное обеспечение:

- Перечень основной и дополнительной литературы.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: в 10 т. Т 6 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 5-е изд. стер. – М.: Физматлит, 2007. – 264 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: в 10 т. Т 7 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 5-е изд. стер. – М.: Физматлит, 2001. – 736 с.

- **Описание материально-технического обеспечения.**
- Учебный кабинет №174, (33,21 м<sup>2</sup>)
- Учебных столов – 9 шт., стульев – 19 шт.,
- 3-х створчатая доска для мела – 1 шт.,
- Стол для преподавателя – 1 шт.
- Стационарный экран для проектора – 1 шт.
- Мультимедийный проектор – Персональный компьютер в комплекте Стол для преподавателя  
Возможность подключения ноутбука и мультимедийного оборудования, беспроводной доступ в интернет  
Список ПО на ноутбуках: Microsoft Windows 10, Microsoft Office 2016, Google Chrome, Mozilla Firefox, Adobe Reader DC, VLC Media Player.

**9. Соответствие результатов обучения по данному элементу ОПОП результатам освоения ОПОП указано в общей характеристике ОПОП.**

**10. Язык преподавания русский.**

**11. Преподаватель (преподаватели).**

Доктор физико-математических наук, профессор Владимир Александрович Дулов.

**12. Автор (авторы) программы.**

Доктор физико-математических наук, профессор Владимир Александрович Дулов.