

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ, АСТРОМЕТРИИ И ГРАВИМЕТРИИ

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета  
МГУ  
\_\_\_\_\_ / Н.Н. Сысоев /  
«\_\_\_» 20 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Наименование дисциплины:**  
**ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ**

---

**Уровень высшего образования:**  
**Специалитет**

---

**Направление подготовки:**  
**03.05.01 Астрономия**

---

**Направленность (профиль) ОПОП:**  
**Общая специальность**

---

**Квалификация «Специалист»**

**Форма обучения:** Очная форма обучения

---

Рабочая программа рассмотрена и одобрена  
Ученым советом физического факультета МГУ

(протокол №\_\_\_\_\_, )

Москва 20\_\_\_\_

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по специальности 03.05.01 Астрономия.

Год (годы) приема на обучение \_\_\_\_\_

**Авторы–составители:**

1. Д.ф.-м.н., профессор Кондратьев Борис Петрович, кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии физического факультета МГУ
2. Д.ф.-м.н., профессор Емельянов Николай Владимирович, кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии физического факультета МГУ

Заведующий кафедрой

Д.ф.-м.н. профессор Жаров Владимир Евгеньевич

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины «Теория возмущений»**

Дисциплина «Теория возмущений» является важной частью современной небесной механики и служит основой для построения аналитических теорий движения небесных тел. На лекциях студенты знакомятся с основными законами небесной механики и методами теории возмущений. Основы теории возмущений были заложены великими математиками и астрономами. В настоящее время теория возмущений получила мощный импульс к развитию благодаря возможностям выполнения сложных аналитических выкладок с помощью специального программного обеспечения и мощных компьютеров. В лекционном курсе классические методы излагаются в новой, более краткой и рациональной форме. Изложение доведено до описания алгоритмов решения типовых практических задач. В курседается вывод основных заключений об устойчивости Солнечной системы. Часть лекций посвящена методу канонических уравнений в форме Пуанкаре. Именно методы теории возмущений позволили получить фундаментальные знания о строении Солнечной системы и движении планет, а также о движении звезд в галактиках.

### **Разделы рабочей программы**

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Форма обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

## **1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО**

Дисциплина «Теория возмущений» реализуется на 4-ом курсе в 7-ом семестре и является составной частью профессионального блока вариативной части.

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

Практикум по небесной механике, научная работа по дисциплинам небесной механики.

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

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

<b>Формируемые компетенции (код компетенции)</b>	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)</b>
УК-1.Б	<p><b>3-1 Знать:</b> фундаментальные законы небесной механики и их взаимосвязь</p> <p><b>3-2 Знать:</b> основные понятия математической обработки наблюдений небесных тел</p> <p><b>У-1 Уметь:</b> строить теоретические модели небесной механики, используя критически анализ данных</p> <p><b>У-2 Уметь:</b> планировать и проводить экспериментальные исследования в области небесной механики, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе численных расчетов</p> <p><b>В-1 Владеть:</b> математическим аппаратом, применяемым в теории возмущений</p> <p><b>В-2 Владеть:</b> методами теоретического исследования явлений и процессов в небесной механике</p>
ОПК-1.Б	<p><b>3-1 Знать:</b> основные математические методы, используемые при решении задач небесной механики</p> <p><b>У-1 Уметь:</b> решать типовые задачи небесной механики</p> <p><b>У-2 Уметь:</b> строить математические модели явлений и процессов небесной механики</p> <p><b>В-1 Владеть:</b> навыками выполнения аналитических выкладок с помощью специального программного обеспечения и компьютеров</p>

**3. Форма обучения:** очная.

**4. Язык обучения:** русский.

**5. Содержание дисциплины**

### *Тема 1. Предмет теории возмущений*

Основные понятия и определения небесной механики. Задача двух тел как основа решения многих задач в теории возмущений. Место теории возмущений в небесной механике. Основ-

ные принципы теории возмущений. Примеры моделей, для которых применима теория возмущений: планетная задача и спутниковая задача. Возмущающая функция и её составляющие.

*Тема 2. Характерные черты теории возмущений на примере движения нелинейного осциллятора с диссипацией.*

Дифференциальное уравнение движения нелинейного осциллятора с одной степенью свободы. Решение уравнения движения осциллятора в невозмущенном случае. Основы метода Лагранжа на данном примере. Решение уравнения в общем случае: периодические, долгопериодические и смешанные члены, вековые члены.

*Тема 3. Движение по оскулирующим орбитам.*

Оскулирующая орбита и оскулирующие элементы. Общий метод Лагранжа изменения произвольных постоянных. Дифференциальные уравнения теории возмущений. Дифференциальные уравнения Лагранжа для кеплеровских элементов орбиты.

*Тема 4. Метод малого параметра Пуанкаре. Метод последовательных приближений.*

Основы метода малого параметра Пуанкаре в теории возмущений и его связь с методом последовательных приближений.

*Тема 5. Возмущающая функция и возмущения.*

Возмущающая функция в небесной механике. Разложение возмущающей функции. Классификация возмущений: вековые и периодические возмущения. Способ Пуассона. Вековые и смешанные возмущения элементов орбит планет и спутников.

*Тема 6. Проблема устойчивости Солнечной системы.*

Выводы Лагранжа и Лапласа об устойчивости Солнечной системы. Соотношение Якоби-Пуанкаре. Классификация возмущений в движении планет. Элементы КАМ-теории. Резонансы в Солнечной системе.

*Тема 7. Методы Лагранжа-Лапласа и Гаусса определения вековых возмущений.*

Метод Лагранжа-Лапласа определения вековых возмущений планет Элементы Лагранжа. Определение вековых возмущений планет. Эволюция орбит планет. Кольца Гаусса и их применение в теории возмущений.

*Тема 8. Метод канонических уравнений в небесной механике.*

Вывод уравнений Гамильтона из уравнений Лагранжа 2-го рода. Значение метода канонических уравнений в небесной механике.

*Тема 9. Канонические преобразования.*

Канонические преобразования. Теорема Якоби о каноничности преобразований. Теорема Гамильтона-Якоби. Уравнение Гамильтона-Якоби и его применение в небесной механике.

*Тема 10. Примеры применения метода канонических уравнений в небесной механике.*

Интегрирование уравнений задачи двух тел методом Гамильтона-Якоби. Связь кеплеровских элементов с элементами Якоби.

*Тема 11. Новые методы в теории возмущений.*

Понятие кольца Гаусса. Потенциал кольца Гаусса. Взаимная энергия колец Гаусса как новый вид возмущающей функции. Применение колец Гаусса в теории возмущений. Двупланетная задача Солнце-Юпитер Сатурн: новые результаты.

## 7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				Семинаров	Самостоятельная работа студентов
		Общая трудоем- кость	в том числе	ауд.	занятий		
Теория возмущений	3	108	72	36	36	36	36

## 8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Теория возмущений» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса; семинарские занятия, предусматривающие углубленное изучение и обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно-практические занятия	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Предмет теории возмущений	4	2	-	2	2	Собеседование,

2	Характерные черты теории возмущений на примере движения нелинейного осциллятора с диссипацией.	4	2	-	2	2	опрос
3	Движение по оскулирующим орбитам.	8	4	-	4	4	
4	Метод малого параметра Пуанкаре. Метод последовательных приближений.	8	4	-	4	4	
5	Возмущающая функция и возмущения.	6	3	-	3	3	
6	Проблема устойчивости Солнечной системы.	8	4	-	4	4	
7	Методы Лагранжа-Лапласа и Гаусса определения вековых возмущений.	12	6	-	6	6	
8	Метод канонических уравнений в небесной механике.	4	2	-	2	2	
9	Канонические преобразования.	4	2	-	2	2	
10	Примеры применения метода канонических уравнений в небесной механике.	6	3	-	3	3	
11	Новые методы в теории возмущений.	8	4	-	4	4	
	Промежуточная аттестация	6					Экзамен в форме письменной работы с последующим собеседованием
<b>ИТОГО:</b>		<b>72</b>	<b>36</b>	<b>-</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	

## 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Теория возмущений» осуществляется на лекциях и семинарских занятиях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиций; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Теория возмущений» проводится в первом семестре в форме зачета. Зачет в форме письменной работы с последующим собеседованием по программе.

Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

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

## **Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как специальная беседа по тематике предыдущей лекции и рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний студента по изученной теме.	Образцы тестов
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену
Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков по для оценивания и анализа различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	Требования к порядку проведения собеседования

## **11. Шкала оценивания.**

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: фундаментальные законы механики и их взаимосвязь УК-1.Б	Отсутствие знаний фундаментальных законов небесной механики и их взаимосвязей	В целом успешные, но не систематические знания фундаментальных законов	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания фундаментальных законов небесной механики и их взаимосвязей	Успешные и систематические знания фундаментальных законов небесной механики и их взаимосвязей

3-1		механики и их взаимосвязей	тальных законов механики и их взаимосвязей	взаимосвязей
<b>ЗНАТЬ:</b> основные понятия математической обработки эксперимента небесной механики УК-1.Б 3-2	Отсутствие знаний или фрагментарное знание основных понятий математической обработки наблюдений в небесной механике	В целом успешное, но не систематическое знание основных понятий математической обработки наблюдений в небесной механике	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знание основных понятий математической обработки наблюдений в небесной механике	Успешное и систематическое знание основных понятий математической обработки наблюдений в небесной механике
<b>ЗНАТЬ:</b> основные математические методы, используемые при решении задач небесной механики ОПК-1.Б 3-1	Отсутствие знаний или фрагментарное применение основных математических методов, при решении задач небесной механики	В целом успешное, но не систематическое применение основных математических методов, при решении задач небесной механики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знание основных математических методов, при решении задач небесной механики	Успешное и систематическое знание основных математических методов, при решении задач небесной механики
<b>УМЕТЬ:</b> строить теоретические модели небесной механики, используя критически анализ данных УК-1.Б У-1	Отсутствие умения строить теоретические модели небесной механики, используя критически анализ данных	В целом успешное, но не систематическое умение строить теоретические модели небесной механики, используя критически анализ данных	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение строить теоретические модели небесной механики, используя критически анализ данных	Успешное и систематическое умение строить теоретические модели небесной механики, используя критически анализ данных
<b>УМЕТЬ:</b> планировать и проводить экспериментальные исследования в области небесной механики, объяснять и оценивать в рамках основных физических	Отсутствие умения планировать и проводить экспериментальные исследования в области небесной механики, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, по-	В целом успешное, но не систематическое умение планировать и проводить экспериментальные исследования в области небесной механики, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, по-	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение планировать и проводить экспериментальные исследования в области небесной механики, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, по-	Успешное и систематическое планировать и проводить экспериментальные исследования в области небесной механики, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, по-

законов результаты, полученные в процессе эксперимента УК-1.Б У-2	лученные в процессе эксперимента	основных физических законов результаты, полученные в процессе эксперимента	оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе эксперимента	таты, полученные в процессе эксперимента
УМЕТЬ: решать типовые задачи небесной механики ОПК-1.Б У-1	Отсутствие умения решать типовые задачи в небесной механике	В целом успешное, но не систематическое умение решать типовые задачи	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение решать типовые задачи	Успешное и систематическое умение решать типовые задачи в небесной механике
УМЕТЬ: строить математические модели явлений и процессов небесной механики ОПК-1.Б У-2	Отсутствие умения строить математические модели физических явлений и процессов	В целом успешное, но не систематическое умение строить математические модели физических явлений и процессов	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение строить математические модели физических явлений и процессов	Успешное и систематическое умение строить математические модели физических явлений и процессов
ВЛАДЕТЬ: математическим аппаратом, применяемым в небесной механике УК-1.Б В-1	Отсутствие/фрагментарное владение математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в небесной механике	В целом успешное, но не систематическое владение математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в небесной механике	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в небесной механике	Успешное и систематическое владение математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в небесной механике
ВЛАДЕТЬ: методами теоретического исследования явлений и процессов в небесной механике УК-1.Б В-2	Отсутствие/фрагментарное владение методами теоретического исследования явлений и процессов в небесной механике	В целом успешное, но не систематическое владение методами теоретического исследования явлений и процессов в небесной механике	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение методами теоретического исследования явлений и процессов в небесной механике	Успешное и систематическое владение методами теоретического исследования явлений и процессов в небесной механике
ВЛАДЕТЬ:	Отсут-	В целом	В це-	Успешное и си-

навыками проведения физического эксперимента и обработки его результатов ОПК-1.Б В-1	ствие/фрагмента рное владение навыками про- ведения физиче- ского экспери- мента и обра- ботки его ре- зультатов	успешное, но не системати- ческое владе- ние навыками про- ведения физиче- ского экспери- мента и обра- ботки его ре- зультатов	лом успешное, но содержащее отдельные пробелы вла- дение навыка- ми про- ведения физиче- ского экспери- мента и обра- ботки его ре- зультатов	стематическое владение навы- ками проведения физического эксперимента и обработки его результатов
--	--	---	---	---

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

*Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся*

Задачи можно найти по адресу: [http://www.sai.msu.ru/neb/rw/cm\\_monog.htm](http://www.sai.msu.ru/neb/rw/cm_monog.htm)

**Пример:** Покажите, что круговые орбиты звезд на периферии однородной сжатой сфероидальной галактики неустойчивы, если эксцентриситет сфероида превосходит значение 0.834. Однородный цилиндр массы  $M$  и радиуса  $R$  может вращаться без трения вокруг горизонтальной оси.

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

*Материалы промежуточной аттестации обучающихся*

Вопросы к экзамену и зачету можно найти по адресу: <http://genphys.phys.msu.ru/rus/edu/>

**Пример:** Возмущающая функция и возмущения.

## 14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

### Основная литература

- Субботин М.Ф. Введение в теоретическую астрономию. М: Наука. 1968. 800с.
- Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. Учебник для студентов университетов, обучающихся по специальности "Астрономия". Издание 3-е, дополненное. М: Наука, 1975 . 800 с.
- Балк М.Б., Демин В.Г., Куницын А.А. Сборник задач по небесной механике и космодинамике. М: Наука. 1968. 336 с.
- Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. М: Физматлит. 2010. 588 с.

### Дополнительная литература

- Емельянов Н. В. Основы теории возмущений в небесной механике. Учебное пособие. М. Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2015 г.. 128 с.

2. Кондратьев Б.П. Теория потенциала в примерах и задачах. Учебное пособие. М. Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2017 г.. 114 с.

Интернет-ресурсы.

[http://www.sai.msu.ru/neb/rw/cm\\_monog.htm](http://www.sai.msu.ru/neb/rw/cm_monog.htm)

**Материально-техническое обеспечение**

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Астрономия».

Курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.